

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
Schwerpunkt Kinderorthopädie
Medizinische Direktorin: Prof. Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

**„Analyse des Reboundphänomens und seiner Einflussfaktoren
nach temporärer Hemi-Epiphysiodese mittels Eight-Plate im Kindesalter “**

Inauguraldissertation zur Erlangung des Doktorgrades der gesamten Humanmedizin

dem Fachbereich Medizin
der Philipps-Universität Marburg vorgelegt von

Thomas Schriener
Marburg 2020

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:
Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekan: Herr Prof. Dr. med. Helmut Schäfer

Referent: Frau Prof. Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann

1. Korreferent: Herr PD Dr. med. F. Schiedel

Nancy und meiner Familie

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Zusammenfassung.....	VI
Summary.....	VIII
1 Einführung.....	1
1.1 Funktionelle Anatomie des Kniegelenks	1
1.2 Skelettwachstum.....	3
1.3 Wachstum der Epiphysenfugen	4
1.4 Physiologische Entwicklung der Beinachse	6
1.5 Physiologische Achsen- und Winkelverhältnisse der unteren Extremität.....	9
1.6 Gelenkwinkel der unteren Extremität.....	11
1.7 Mechanische Beinachse und mechanische Achsendeviation	12
1.8 Pathologische Achsenverhältnisse der unteren Extremität	13
1.9 Pathologische Bedeutung des Malalignments	15
1.10 Ursachen kindlicher Achsendeviationen in der Frontalebene	17
1.11 Behandlungsverfahren zur Korrektur von Achsfehlstellungen	18
1.11.1 Konservative Verfahren.....	18
1.11.2 Operative Verfahren	18
2 Zielsetzung der Dissertation.....	24
3 Patienten und Methoden.....	25
3.1 Studiendesign.....	25
3.2 Patientenkollektiv	25
3.3 Klinische Parameter	27
3.3.1 Indikation zur Epiphysiodese	27
3.3.2 Lokalisation der Epiphysiodese	27
3.3.3 Chronologisches Alter	27
3.3.4 Gewicht, Größe, Body-Mass-Index	28
3.3.5 Korrekturzeitraum.....	28
3.3.6 Follow-up/ Nachuntersuchungszeitraum.....	28

3.4	Radiologische Parameter	28
3.4.1	Biologisches Alter	29
3.4.2	Mechanische Winkel und Abstände zur Beinvermessung	29
3.5	Vergleich einzelner Parameter mit der radiologisch ermittelten MAD.....	30
3.6	Statistische Analyse.....	33
3.7	Klinische Beispiele aus dem eigenen Kollektiv	34
3.7.1	Korrektur eines Genu Valgum mittels Eight-Plate.....	34
3.7.2	Korrektur eines Genu Varum mittels Eight-Plate	36
4	Ergebnisse	38
4.1	Klinische Parameter	38
4.1.1	Indikation zur Epiphysiodese	38
4.1.2	Lokalisation der Epiphysiodese	39
4.1.3	Chronologisches Alter	40
4.1.4	Gewicht, Größe, Body-Mass-Index	41
4.1.5	Korrekturzeitraum.....	43
4.1.6	Nachuntersuchungszeitraum (Follow-up/Reboundzeit)	43
4.2	Radiologische Parameter	45
4.2.1	Biologisches Alter	45
4.2.2	Mechanische Winkel und Abstände zur Beinvermessung	45
4.3	Rebound der MAD innerhalb der Genu valgum-Kohorte.....	53
4.3.1	Vergleich Rebound MAD und biologisches Alter.....	53
4.3.2	Vergleich Rebound MAD und chronologisches Alter	54
4.3.3	Vergleich Rebound MAD und Körpergewicht	55
4.3.4	Vergleich Rebound MAD und Körpergröße.....	56
4.3.5	Vergleich Rebound MAD und Geschlecht	57
4.3.6	Vergleich Rebound MAD und operierte Seite	58
4.3.7	Vergleich Rebound MAD und Korrekturdauer	59
4.3.8	Vergleich Rebound MAD und Nachuntersuchungsdauer.....	60
4.3.9	Vergleich Rebound MAD und absolute Korrektur (mm)	61
4.4	Rebound der MAD innerhalb der Genu varum-Kohorte	63
4.4.1	Vergleich Rebound MAD und biologisches Alter.....	63
4.4.2	Vergleich MAD und chronologisches Alter.....	64

4.4.3	Vergleich MAD und Körpergewicht	65
4.4.4	Vergleich MAD und Körpergröße	66
4.4.5	Vergleich MAD und Geschlecht.....	67
4.4.6	Vergleich MAD und operierte Seite	68
4.4.7	Vergleich MAD und Korrekturdauer.....	69
4.4.8	Vergleich MAD und Nachuntersuchungsdauer	70
4.4.9	Vergleich MAD und absolute Korrektur	71
5	Diskussion	72
5.1	Diskussion der Methode	72
5.2	Diskussion der Ergebnisse	77
5.3	Zusammenfassung der Diskussion	86
	Literaturverzeichnis	IX
	Abbildungsverzeichnis	XVI
	Diagrammverzeichnis	XVII
	Tabellenverzeichnis	XIX
	Ehrenwörtliche Erklärung	XX

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
Abd.	Abduktion
Add.	Adduktion
aFTW	anatomischer femorotibialer Winkel
aLDFW	anatomischer lateral-distaler Femurwinkel
aLDTW	anatomischer lateral- distaler Tibiawinkel
aMPTW	anatomischer medial-proximaler Tibiawinkel
a.p.	anterior posterior
AR	Außenrotation
BAA	Beinachsenabweichungen
BLD	Beinlängendifferenzen
BMI	Body-Mass-Index
ca.	circa
CCD-Winkel	Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel
cm	Zentimeter
et al.	et alii
Fa.	Firma
FSB	fibulares Seitenband
Ext.	Extension
Flex.	Flexion
Gy	Gray
HKB	hinteres Kreuzband
IKA	Interkondylarabstand
IMA	Intermalleolarabstand
IR	Innenrotation
KSW	Kniespaltwinkel
kg	Kilogramm
Lig.	Ligamentum
Lj.	Lebensjahr

LKB	Laterales Kapselband
m	Meter
M.	Musculus
MAD	mechanische Achsdeviation
ME	Materialentfernung
mFTW	mechanischer femorotibialer Winkel
mLDFW	mechanischer lateral-distaler Femurwinkel
mLDTW	mechanischer lateral-distaler Tibiawinkel
mLPFW	mechanischer lateral-proximaler Femurwinkel
mMPTW	mechanischer medial-proximaler Tibiawinkel
MKB	mediales Kapselband
Mm.	Musculi
mm	Millimeter
MW	Mittelwert
n	Anzahl
N.	Nervus
OP	Operation
o.g.	oben genannt
p	p-Wert (Signifikanzwert)
PETS	percutaneous epiphysiodesis using transphyseal screw
prox.	proximal
R.	Ramus
s	Sekunde
SD	Standardabweichung
SSW	Schwangerschaftswoche
Tab.	Tabelle
TSB	tibiales Seitenband
V.	Vena
VKB	vorderes Kreuzband
WHO	World Health Organization

Zusammenfassung

Die temporäre Wachstumslenkung mittels Epiphysiodesen ist ein seit vielen Jahren etabliertes Verfahren zur Korrektur jugendlicher Achsfehlstellungen in der Frontalebene. Das wieder einsetzende Wachstum der Epiphysenfuge nach Entfernung der Epiphysiodesen führt häufig zu erneuten Achsfehlstellungen meist hin zur originären Ausgangsstellung. Diese als Reboundphänomen bezeichnete Komplikation wurde in der vorliegenden Arbeit näher untersucht und mögliche Einflussfaktoren hierfür identifiziert.

Es wurden die klinischen und radiologischen Daten von jugendlichen Patienten retrospektiv ausgewertet, die zwischen 2007 und 2016 aufgrund eines idiopathischen Malalignments der Frontalebene mit der sogenannten Eight-Plate behandelt wurden. Ausschlusskriterien waren noch laufende Therapieverfahren, sowie nicht idiopathische Ursachen von Achsfehlstellungen der unteren Extremität. Ein Malalignment bzw. ein späterer Rebound wurde durch den mLDFW, mMPTW, mTFW, sowie die MAD vor, während und nach Entfernung der Epiphysiodese anhand von radiologischen Ganzbeinstandaufnahmen untersucht und mit den Normwerten nach Paley verglichen. Darüber hinaus wurde das biologische Alter zu Beginn der Wachstumslenkung radiologisch nach Greulich/Pyle errechnet.

Insgesamt wurden 145 Eight-Plates in 60 Patienten eingebracht, wovon 50 Patienten ein pathologisches Genu valgum und zehn Patienten ein pathologisches Genu varum aufwiesen. Das durchschnittliche Alter bzw. der Body-Mass-Index betrugen zum Zeitpunkt der Implantation 13,4 Jahre bzw. 24kg/m^2 und zum Zeitpunkt der Metallentfernung 14,2 Jahre bzw. $24,6\text{kg/m}^2$. Die mechanische Achsendeviation konnte von initial 11,6mm lateral auf 3,2mm medial bis zur Metallentfernung korrigiert werden. Die durchschnittliche Nachuntersuchungszeit bzw. Follow-Up oder Reboundzeit betrug 17 Wochen. In den Nachuntersuchungen zeigte sich eine durchschnittliche MAD von 1,2mm lateral. Die Reboundquote lag in unserer Arbeit bei 96,5 %, in aller Regel in Richtung der originären Fehlstellung. Der Rebound betrug hierbei im Schnitt 6,5mm und führte dazu, dass circa 20% der behandelten Patienten in der abschließenden Nachuntersuchung eine pathologische Achsfehlstellung verglichen mit der Norm nach Paley und Galla et al. aufwiesen. In der Genu valgum Kohorte zeigten sich hierfür vor allem ein frühes Eintrittsalter zu Beginn der Wachstumslenkung, sowie eine kurze Korrekturdauer und große absolute Achskorrekturen

verantwortlich. Für die kleinere Genu varum Kohorte waren dies vor allem ein geringes Körpergewicht, sowie eine große absolute Achskorrektur gemessen an der MAD. Insgesamt konnte die Wachstumslenkung durch die Eight-Plate in unserer Arbeit als sicheres Verfahren zur Korrektur jugendlicher Achsfehlstellungen der Frontalebene angewendet werden. Abhängig von der initialen Fehlstellung konnten darüber hinaus unterschiedliche Einflussfaktoren eines Rebounds identifiziert werden, die die Erkenntnisse der aktuellen Literatur größtenteils widerspiegeln und bestätigen. Das zu erwartende Ausmaß eines Reboundphänomens konnte in dieser Arbeit näherungsweise konkretisiert werden und bleibt in Zukunft Gegenstand weiterer Beobachtungen. In Zusammenschau der vorliegenden Erkenntnisse empfehlen wir, einen Rebound bereits bei der Planung einer jugendlichen Wachstumslenkung zu berücksichtigen und gegebenenfalls auch Überkorrekturen in den normativen Grenzen vorzunehmen. Patienten sollten darüber hinaus bereits vor Beginn der Therapie über mögliche Revisionsoperation aufgeklärt werden. Für die Zukunft werden größere, prospektive Studien benötigt, um die dringend benötigten Erkenntnisse über das zu erwartende Ausmaß eines Rebounds und dessen mögliche Einflussfaktoren zu erlangen.

Summary

The purpose of this study was to quantify the magnitude and identify risk factors for the so-called rebound phenomenon after growth modulation by hemi-epiphysiodesis with the Eight-Plate. Therefore we analysed the records of 60 patients between ten and sixteen years of age who had been treated with the Eight-Plate because of Malalignments in the frontal plane of the lower extremities in the years between 2007 and 2016.

The indication for treatment with temporary growth arrest by implanting Eight-Plates was the pathological axis of the lower limbs such as a genu varum or valgum as defined by the norms of Paley. A pathological genu valgum was the most common reason for surgical correction as it covered 50 out of 60 Patients. A total number of 145 plates had been implanted into 116 knees of 40 male and 20 female patients. Full-length standing anteroposterior radiographs of both lower limbs were taken before the initial surgery, at every follow-up visit and once after the removal of the plates to record the mechanical lateral distal femoral angle, the medial proximal tibial angle and the mechanical axis deviation of the lower limbs. The Greulich and Pyle atlas was used to determine the skeletal age and to predict the remaining growth of the lower limbs setting the date for intervention. Removal of the plates was considered when the mechanical axis passed through the centre of the knee. The following clinical variables were recorded: gender, age, body weight, height and body mass index (BMI) at the time of surgery; and change of height and body weight between the initial surgery and the removal of the plates. The mechanical axis deviation was defined as the most important parameter of a Malalignment and was statistically compared with the radiographic and clinical variables using linear regression models. The degree of rebound was measured in millimetres of deviation from the mechanical axis.

In this study 96.5% of all patients showed a rebound after removal of the plates, this being most commonly in the direction of the former deformity. In 20% of all patients the axis went back to a pathological Malalignment in comparison to the norms of Paley and Galla et al. In our multivariate regression analysis an independent predictive value for the degree of rebound was shown for low body weight and the extent of correction in the genu varum group. In the genu valgum group the multivariate regression analysis pointed out three significant predictive values for the magnitude of rebound: the age at the time of correction, the total duration of correction as well as the extent of correction. The younger the patients,

the faster the correction was achieved by the plates and the bigger the correction of the mechanical axis in the first place, the more likely and greater the rebound after the removal of the plates appeared. Limitations of this study include its retrospective design and small sample size especially the sample size of the cases which originally had genua vara is limited. Therefore no adequate comparison between the two groups was possible.

In conclusion, independent predictive variables for the magnitude of the rebound phenomenon measured by the mechanical axis deviation could be determined within this study. We believe that the rate of correction is the strongest independent contributing factor to the rebound phenomenon as it is shown in both groups. Since almost all patients in our study have shown some degree of rebound, a certain amount of overcorrection might possibly be beneficial in terms of maintaining a physiological axis after growth modulation of the lower limbs by hemi-epiphysiodesis with the Eight-Plate. Further examination with larger cohort sizes within prospective studies is needed to show possible effects of over- and undercorrection on the rebound phenomenon regarding the results of this study.

1 Einführung

1.1 Funktionelle Anatomie des Kniegelenks

Die Articulatio genus ist die größte und zugleich komplizierteste Diarthrose des menschlichen Körpers. Sie wird als transportables Drehscharniergelenk bezeichnet und besteht aus dem Femorotibialgelenk und dem Femoropatellargelenk, welches als Fortsetzung der Tibiagelenkfläche angesehen wird (Strasser 1908). Die Artikulation zwischen den bikonvexen Femurkondylen und den beiden reziprok konkav geformten Tibiagelenkflächen weist dabei eine starke Inkongruenz auf, die durch die beiden Menisci ausgeglichen wird (Niethard 2010). Das Zusammenspiel beider Gelenkpartner beschreibt eine Roll-Gleitbewegung, deren Ausmaß sich in Abhängigkeit des Extensions- und Flexionsgrades ändert und anpasst (Paley und Herzenberg 2005). Durch diese Bewegung werden sechs Freiheitsgrade ermöglicht, die als gekoppelte Bewegungen betrachtet werden.

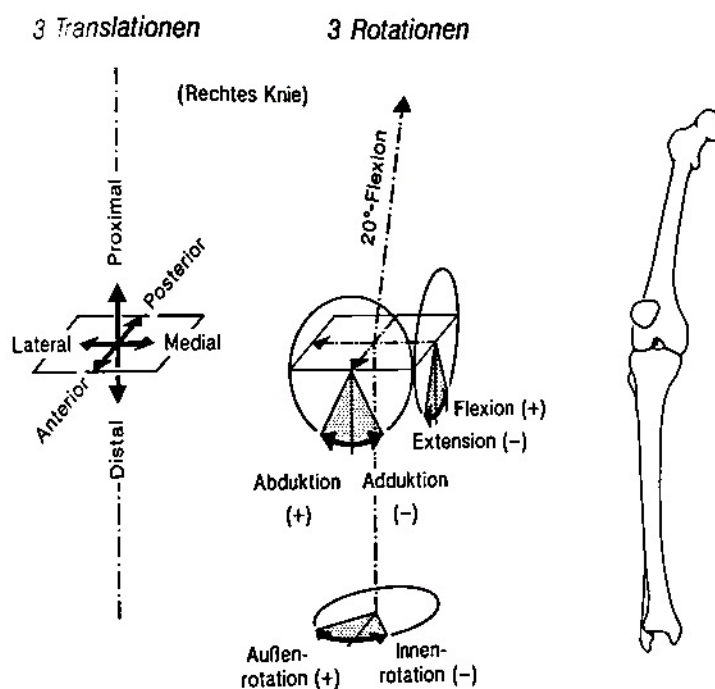


Abb. 1 Die sechs Freiheitsgrade des Kniegelenks (Rauber und Kopsch 2003)

Voraussetzung für die großen Bewegungsamplituden im Kniegelenk ist neben der geringen knöchernen Führung das hohe Maß an Stabilität, welches durch zahlreiche Ligamente und Muskelgruppen aktiv und passiv stabilisiert wird. Aus funktioneller Sicht lassen sich fünf verschiedene Kompartimente unterteilen (Tab. 1).

Einflussgröße	Kniestellung	Primärer Stabilisator	Sekundärer Stabilisator
Valgusstress	Flexion	TSB	MKB / VKB / HKB
	Extension	TSB	MKB / VKB Med. Kondyle
Varusstress	Flexion	VKB M. popliteus Lig. arcuatum	HKB
	Extension	FSB Tractus iliotibialis	
Vordere Schublade		VKB	MKB Hinteres Schrägband Lig. femorotibiale lat. ant.
Hinterere Schublade		HKB	
Hyperextension		VKB	HKB Dorsale Kapsel
Innenrotation	Flexion	VKB / HKB	LKB M. popliteus
	Extension	VKB	LKB / HKB Lig. femorotibiale lat. ant. Lig. femorotibiale. ant. M. popliteus
Außenrotation	Flexion	TSB	MKB / LKB / VKB Hinteres Schrägband M. popliteus

Tab. 1 Stabilisatoren des Kniegelenks (Rauber und Kopsch 2003)

Legende: TSB- Tibiales Seitenband; FSB- Fibulares Seitenband; MKB- Mittleres Kapselband; VKB-Vorderes Kreuzband; HKB- Hinteres Kreuzband; LKB- Laterales Kapselband

1.2 Skelettwachstum

Das Skelettwachstum wird als dynamischer Vorgang verstanden, der in eine prä- und eine postnatale Phase unterteilt werden kann. Er unterliegt fünf Gesetzmäßigkeiten:

- Wachstum ist genetisch bedingt
- Wachstum verläuft in Phasen
- Wachstum verläuft ganztägig
- Wachstum wird von exogenen und endogenen Faktoren bestimmt
- Wachstum ist eine Stoffwechselleistung

Dabei gilt, dass die größte Wachstumsgeschwindigkeit unter physiologischen Bedingungen in der pränatalen Phase stattfindet (Hefti 1997; Rauber und Kopsch 2003). Die postnatale Phase wird in drei wesentliche Wachstumsphasen unterteilt (Abb. 2):

- Wachstumsphase des Säuglings- und Kleinkindalters: Diese geht mit einer hohen, aber stetig langsamer werdenden Wachstumsgeschwindigkeit bis zum 5. Lebensjahr einher.
- Die zweite Phase im Kindesalter unterliegt einem kontinuierlichen und langsameren Wachstum von ungefähr sechs Zentimetern pro Jahr (Niethard 2010).
- Die Pubertät stellt die dritte und letzte Phase des Wachstums dar. Sie ist durch Wachstumsschübe geprägt, welche bei Jungen zwar später, dafür aber ausgeprägter ausfallen als bei Mädchen gleichen Alters. Mit dem Ende des 13. Lebensjahres bei Mädchen und des 15. Lebensjahres bei Jungen kommt es zu einem Sistieren des Wachstums der unteren Extremität mit Verschluss der Epiphysenfugen. Das Restwachstum betrifft von nun an nur noch die Wirbelsäule (Brighton 1984). Der Zeitpunkt des Epiphysenverschlusses ist von verschiedenen Faktoren wie Genetik, Geschlecht, Belastung etc. abhängig und von Knochen zu Knochen unterschiedlich. Innerhalb eines Knochens unterscheidet sich dieser abermals zwischen der proximalen und der distalen

Wachstumsfuge. So ist beispielsweise die distale Wachstumsfuge des Humerus bereits mit Vollendung des 16. Lebensjahres geschlossen, während sich die proximale erst um das 20. Lebensjahr vollständig schließt (Pauwels 1973).

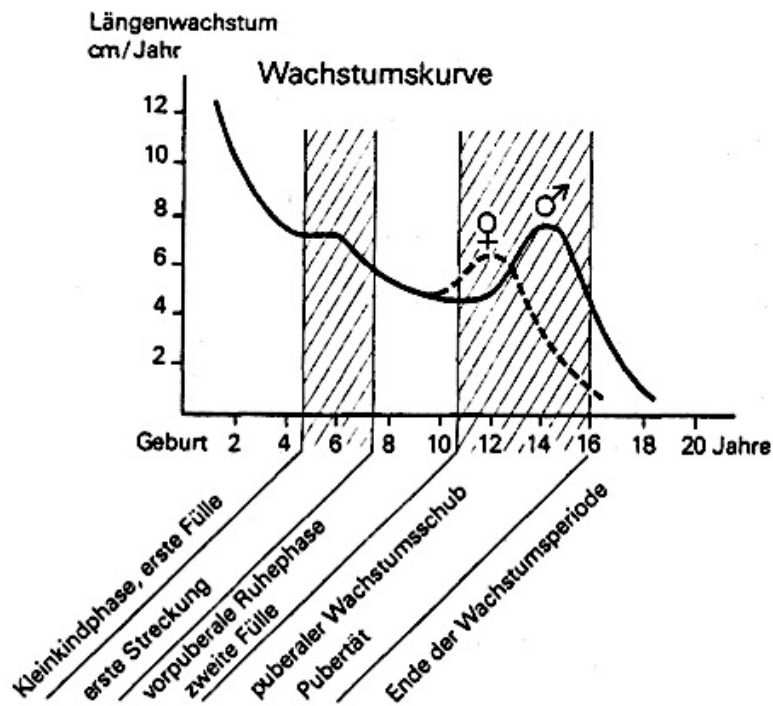


Abb. 2 Jährliches Körperlängenwachstum (Niethard 2010)

1.3 Wachstum der Epiphysenfugen

Die Epiphysenfugen der Extremitätenknochen sind in unterschiedlichem Maße am Längenwachstum der einzelnen Knochen beteiligt und unterliegen verschiedenen endogenen und exogenen Einflussfaktoren. Den endogenen Faktoren werden der genetische Bauplan des Knochenskeletts und die Modulation durch Hormone und Vitamine zugeschrieben. Bei ungestörter metabolischer und endokrinologischer Entwicklung ist der An- und Abbau des Knochengewebes und damit das Wachstum des Knochens in Länge und Breite proportional abhängig vom Einfluss eines exogenen Kräftepaares, bestehend aus der von außen einwirkenden Gravitationskraft und der von innen wirkenden Muskel- und Bandbelastung (Niethard 2010). Diese Kräfte wirken in entgegengesetzten Richtungen auf den Körper ein.

Dabei ist das Längen- und Breitenwachstum als Folge einer Funktionsanpassung des Knochens auf äußere Belastungen, z.B. Biegebeanspruchung zu verstehen (Pauwels 1948).

Das wesentliche Längenwachstum der Beine rekrutiert sich aus sechs Epiphysenfugen, von denen jeweils zwei auf Femur, Tibia und Fibula entfallen. Dabei gilt, dass 65 % des Wachstums eines Beines um das Kniegelenk herum stattfindet. Entscheidend für eine gerade Beinachse ist das synchrone Wachsen von Tibia und Fibula. Das beschleunigte Wachstum eines der beiden Knochen führt zur Achsfehlstellung im Sinne eines Genu varum bzw. valgum (Niethard 2010).

Es gilt allgemein, dass Fugen mit einem hohen Maße an Wachstum sich später verschließen als Fugen mit einer niedrigen Wachstumspotenz. Dementsprechend werden Achsabweichungen in der Regel an ausgeprägt wachsenden Fugen korrigiert, auch, weil mehr Zeit für eine Korrektur zur Verfügung steht (Hefti 1997).

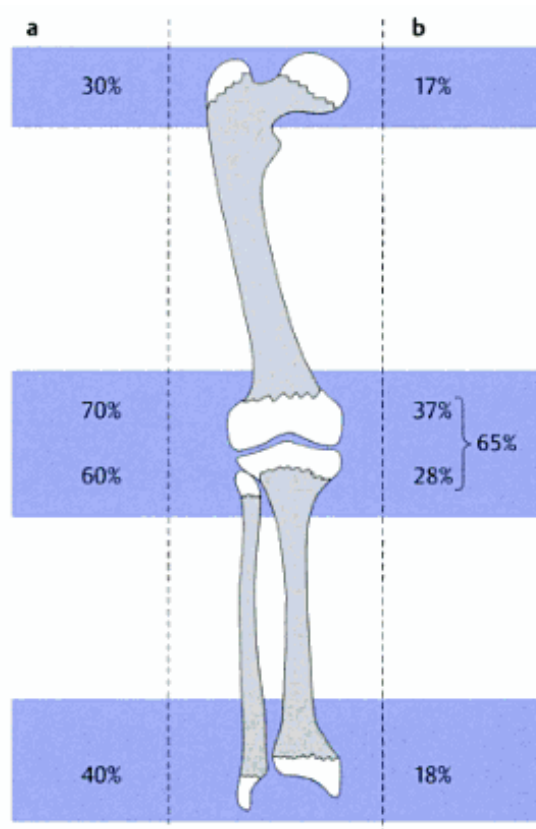


Abb. 3 Anteile der Wachstumszonen der unteren Extremität an der Länge des Femurs bzw. der Tibia (a) und des gesamten Beines (b) (Exner 2003)

1.4 Physiologische Entwicklung der Beinachse

Im Rahmen der Knochenentwicklung der unteren Extremität durchlaufen die Beinachsen charakteristische Veränderungen. Dabei bedingen sich die Entwicklungen der drei Teilabschnitte Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß gegenseitig (Westhoff, Jäger und Krauspe 2007). Die Beinachsen passen sich in jedem Lebensabschnitt den momentanen Bedürfnissen des Kindes an und beeinflussen durch ihr Wachstum wiederum die Entwicklung des Kindes. Durch die Vertikalisierung der Körperachse erweitert sich der Bewegungsumfang, der in der Folge durch die veränderten Zug- und Druckbelastungen wiederum die Knochenentwicklung maßgeblich beeinflusst.

In der Transversalebene kommt es durch zwei Detorsionsschübe zwischen dem 6. – 8. respektive dem 12. – 14. Lebensjahr zu einer Reduktion der Antetorsion der Schenkelhalse von ursprünglich 31° zu 15° durchschnittlicher Antetorsion. Dabei spiegelt die Antetorsion den aktuellen Stand der Vertikalisierung des Menschen wieder und beeinflusst damit sowohl die Aufrichtung der Körperachse als auch die Rotationsfähigkeit der Hüfte maßgeblich (Hefti 1997; Arazi, Ögün und Memik 2001; Salenius und Vankka 1975; Heath und Staheli 1993; Ferrick, Birch und Albright 2004). Bei erhöhter Antetorsion ist auch die Innenrotationsfähigkeit des Hüftgelenks vergrößert (Westhoff, Jäger und Krauspe 2007). Ein Innenrotationsgangbild ist für Kinder bis zum zehnten Lebensjahr daher nicht unphysiologisch und geht häufig kompensatorisch mit Knick-Senk-Füßen einher (Strecker, Keppler und Kinzl 1997). Im Laufe des kindlichen Wachstums kommt es dann zu einer Außentorsion der Tibia und damit des Fußes um ca. 15° . Mit Abschluss des Wachstums sollten die Füße im Vergleich zum Oberschenkel eine Außenrotation von $10 - 20^\circ$ aufweisen.

Die Entwicklung der Beinachse in der Frontalebene wird hauptsächlich durch den Collum-Diaphysen-Winkel und den tibiofemorale Winkel bestimmt.

Der Collum-Diaphysen-Winkel verringert sich von postnatal 145° auf ca. 126° bei Wachstumsabschluss, was zur Ausbildung der valgischen Beinachse des Erwachsenen beiträgt. Salenius und Vanka beschrieben die Veränderungen der Beinachse in der Frontalebene im Laufe des Wachstums in Bezug auf das Kniegelenk als eine „umwegige Beinachsenentwicklung“ (Salenius und Vankka 1975).

Pauwels erklärt diese „umwegige Beinachsenentwicklung“ mit der funktionellen Anpassung durch Längenwachstum (Pauwels 1973).

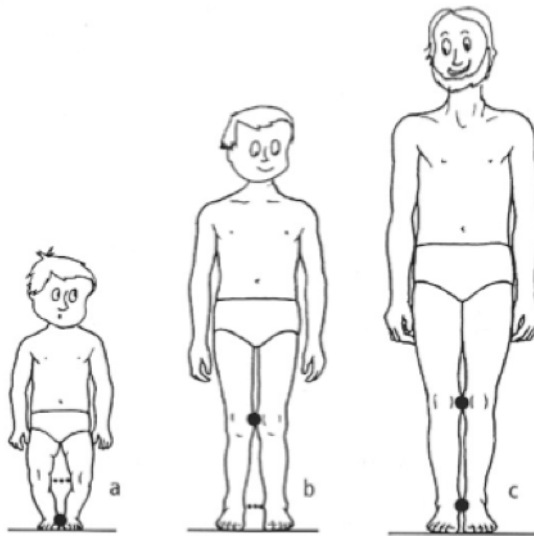


Abb. 4 Die Beinachse im Kindesalter – das umwegige Wachstum (Strecker, Keppler, und Kinzl 1997)

Während im Säuglingsalter noch eine varische Beinachse von ca. 15° vorliegt, die eher einem Crus varum als einem Genu varum gleicht, kommt es im weiteren Verlauf bis zum 3. – 4. Lj. zur Entwicklung einer valgischen Beinachse von ca. 10° . Der Grund für die Valgisierung der Beinachse liegt in der Veränderung der Beanspruchung der Wachstumszonen. So kommt es im Kniegelenk zu einer vermehrten medialen Druckbelastung kombiniert mit einer lateralen Zugbelastung. Die höhere Beanspruchung der medialen Wachstumszone führt zu einem vermehrten Wachstum an der medialen Epiphysenfuge. Die Direktionslinie bzw. die Traglinie der mechanischen Beinachse verschiebt sich nach lateral (von Mikulicz-Radecki 1878; Pauwels 1965b; von Lanz und Wachsmuth 1935). Mit zunehmendem Wachstum steigt nun die Druckbelastung an der lateralen Seite der Epiphysenfuge, sodass sich mit ca. sechs Jahren die Valgusstellung langsam in Richtung Ausgeradung korrigiert und das Bein die physiologisch leichte Valgusstellung von ca. $5 - 7^\circ$ einnimmt. Diese physiologische Valgusstellung sollte bis zum zehnten Lebensjahr erreicht sein (Abb. 5). Ab dem zehnten Lebensjahr ist bei einer valgischen Beinachse von mehr als 10° nicht mehr von einer spontanen Ausgeradung der Beinachse in der Frontalebene auszugehen und daher eine Korrektur zu empfehlen (Galla und Lobenhoffer 2007).

In der Sagittalebene hat die Vertikalisierung der Körperachse eine Abnahme des Genu recurvatum von 10 – 15° bei Geburt auf ca. 5° bei Wachstumsabschluss zur Folge.

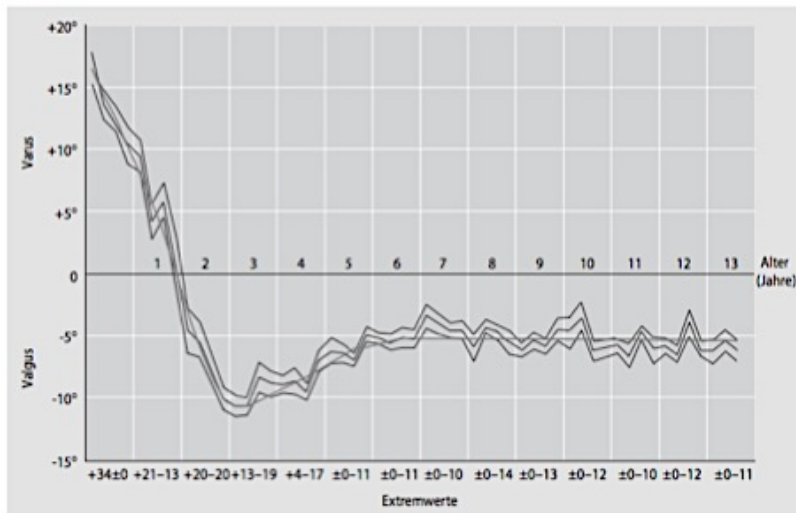


Abb. 5 Physiologische Entwicklung der Beinachse in der Frontalebene (Fick 2013)

1.5 Physiologische Achsen- und Winkelverhältnisse der unteren Extremität

Das genaue Wissen über die anatomischen und mechanischen Achsen- und Winkelverhältnisse des Skelettsystems ist bei allen Untersuchungen und insbesondere für die Korrektur von Fehlstellungen in der Orthopädie unerlässlich.

Die Achsen des Skelettsystems werden in eine anatomische und eine mechanische Achse unterschieden. Die anatomische Achse entspricht den Mittelschaftlinien der langen Röhrenknochen, welche durch die Mitte der Diaphyse verlaufen (Moreland, Bassett und Hanker 1987). In der Frontalebene ist diese Achse für das Femur gerade, während sie in der Sagittalen gekrümmt ist. Für die Tibia ergibt sich im Normalfall in beiden Ebenen eine gerade Achse.

Die mechanische Achse hingegen ist definiert als die Verbindungslinie zwischen den proximalen und distalen Gelenkzentren des jeweiligen Knochens.

Für das Femur verläuft sie von der Mitte des Caput femoris bis zum Kniegelenkszentrum, welches definiert ist als Mittelpunkt einer Tangente zwischen dem Außenrand der tibialen oder femoralen Kondylen bzw. als der Raum zwischen den beiden Eminentien (Moreland, Bassett und Hanker 1987). Die mechanische Achse der Tibia verläuft dementsprechend vom Zentrum des Kniegelenks zur Mitte des oberen Sprunggelenkes, welches definiert ist als Mittelpunkt der Tangente zwischen lateralem und medialem Malleolus bzw. dem Mittelpunkt der Distanz zwischen medialem und lateralem Rand des Talus.

Die anatomischen und mechanischen Achsen der jeweiligen Beinabschnitte bilden einen anatomisch-mechanischen Winkel, der nach Fick $5-7^\circ$ bzw. nach Paley $7^\circ \pm 2^\circ$ für das Femur beträgt. Für die Tibia beträgt der anatomisch-mechanische Winkel 0° , da beide Achsen in der Frontalebene parallel stehen (Fick 2013; Paley und Herzenberg 2005). Bringt man die genannten Achsen des Femurs und der Tibia in Beziehung zueinander, so ergeben sich im Bereich des Kniegelenkes zwei Winkel, der mechanische bzw. der anatomische tibiofemorale Winkel (Abb. 6 u. 7).

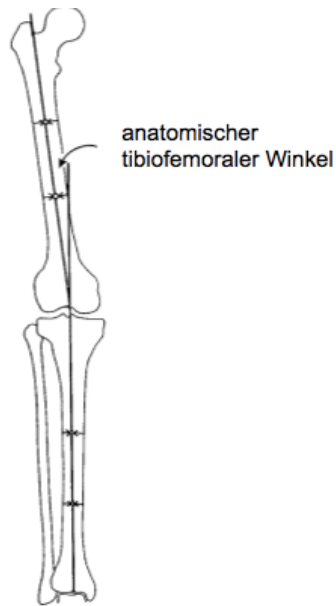


Abb. 6 aTFW

(Paley und Herzenberg 2005)

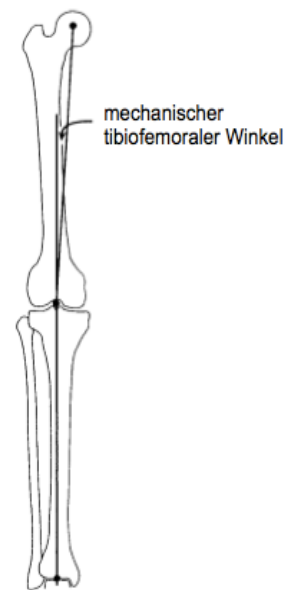


Abb. 7 mTFW

(Paley und Herzenberg 2005)

Für beide Winkel existieren in der Literatur verschiedene Angaben. Der mechanisch-tibiofemorale Winkel wird mit $1,0^\circ - 1,3^\circ \pm 2,8^\circ$ Varus angegeben.

Der anatomisch-tibiofemorale Winkel wird nach Paley mit $6,85^\circ \pm 1,4^\circ$ angegeben (Moreland, Bassett und Hanker 1987; Hsu et al. 1990; Cooke, Li und Scudamore 1994; Paley und Herzenberg 2005).

1.6 Gelenkwinkel der unteren Extremität

Aus den oben beschriebenen anatomischen und mechanischen Achsen und deren Verhältnis zu den Orientierungslinien ergeben sich darüber hinaus charakteristische Gelenkwinkel für die untere Extremität in der Frontalebene, die in Abbildung 8 graphisch dargestellt sind.

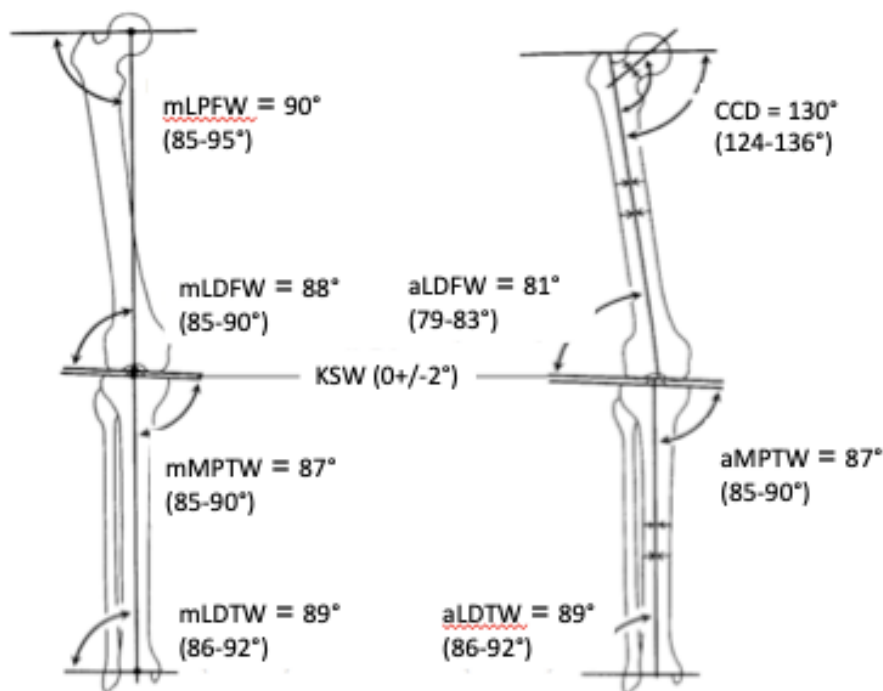


Abb. 8 Überblick über a) mechanische und b) anatomische Achsen bzw. Winkel der unteren Extremität in der Frontalebene (Paley und Herzenberg 2005)

Legende: a/mLPFW- anatomischer/mechanischer lateral-proximaler Femurwinkel; a/mLDFW- anatomischer/mechanischer lateral-distaler Femurwinkel; a/mMPTW- anatomischer/mechanischer medial-proximaler Tibiawinkel; a/mLDTW- anatomischer/mechanischer lateral-distaler Tibiawinkel; CCD- Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel; KSW- Kniespaltwinkel

1.7 Mechanische Beinachse und mechanische Achsendeviation

Die mechanische Beinachse, oder auch Mikuliczlinie genannt, welche vom Hüftgelenkszentrum bis zur Mitte des oberen Sprunggelenks verläuft, setzt die beschriebenen Achsen und Winkel in Beziehung zur Belastung bzw. zu den Druckverteilungen auf die Gelenke. Sie stellt die Traglinie des Beines dar und steht im direkten Zusammenhang mit dem mechanisch-tibiofemorale Winkel. Schneidet die Tragachse des Beines den Kniegelenksmittelpunkt, so ergibt sich daraus ein tibiofemorale Winkel von 0° . Unter physiologischen Bedingungen verläuft die mechanische Beinachse jedoch medial der Kniegelenksmitte, sodass der mechanisch-tibiofemorale Winkel positive Werte annimmt (von Mikulicz-Radecki 1878; Fick 2013; von Lanz und Wachsmuth 1935). Den Abstand zwischen der mechanischen Beinachse und dem Kniegelenksmittelpunkt definierten Petersen und Paley als mechanische Achsendeviation (Abb.9). Sie sollte nach Wachstumsabschluss $9,7 \text{ mm} \pm 6,8 \text{ mm}$ medial des Kniegelenkszentrums liegen (Petersen und Engh 1988; Paley et al. 1994). Dies entspricht einer annähernd geraden Beinachse in der sich sowohl die Femurkondylen als auch die Malleolen bei geschlossenem Stand berühren (Hefti 2000).

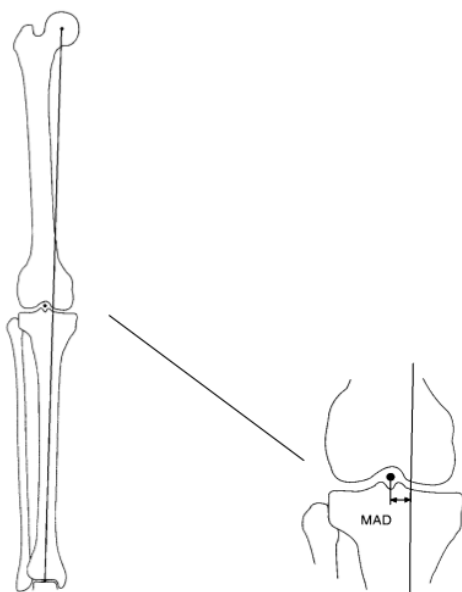


Abb. 9 Mechanische Beinachse und MAD (Paley und Herzenberg 2005)

1.8 Pathologische Achsenverhältnisse der unteren Extremität

Abweichungen der Beinachse von der physiologischen Norm, sogenannte Malalignments, können in der frontalen, sagittalen oder transversalen Ebene auftreten (Tab.3).

Die häufigste und damit klinisch relevanteste Abweichung ist die in der Frontalebene, welche in der Varus- oder in der Valgusfehlstellung vorkommt (Strecker und Keppler 2014). Über die genaue Definition eines Malalignments in der Frontalebene herrscht in der Literatur keine einheitliche Meinung vor.

Paley bzw. Galla et al. definieren anhand von radiologisch vermessenen Ganzbeinstandaufnahmen absolute Abweichungen der MAD von >15 mm nach medial der Kniegelenksmitte als signifikante Varus- und von >10 mm nach lateral als signifikante Valgusfehlstellung (Paley und Herzenberg 2005; Galla und Lobenhoffer 2007).

Je weiter die Direktionslinie vom Kniemittelpunkt entfernt liegt, desto größer wird dabei der tibiofemorale Winkel, diese Beziehung ist linear (Yoshioka, Siu und Cooke 1987). Je größer also die MAD nach medial ausweicht, desto stärker ist die Varusstellung des mechanisch-tibiofemorale Winkels. Andersherum entspricht ein lateraler Verlauf der Direktionslinie im Hinblick auf die Kniegelenksmitte einer Valgusstellung des Beines (von Lanz und Wachsmuth 1935; von Mikulicz-Radecki 1878; Wright, Treble und Feinstein 1991).

Genu varum	Genu valgum
– anatomischer femoro-tibialer Winkel > 173–175°	– anatomischer femoro-tibialer Winkel < 173–175°
– Mikulicz-Linie medial des 4-mm-Punktes,	– Mikulicz-Linie lateral 4-mm-Punktes,
– signifikant > 15 mm medial des Kniegelenkzentrums	– signifikant > 10 mm lateral des Kniegelenkzentrums

Abb. 10 Definition Valgus-/Varusdeviation des Kniegelenks (Galla und Lobenhoffer 2007)

Da eine Valgus- bzw. Varusdeviation sowohl eine femorale als auch tibiale Ursache haben kann, muss das Malalignment näher differenziert werden. Hierzu werden die oben besprochenen Gelenk- und Achsenwinkel gemessen und mit den Normwerten verglichen (Abb. 8). Der Malalignment-Test kann dabei als Leitfaden zur Ursachenfindung genutzt werden (Strecker und Keppler 2014). Misst man bei einer Varusfehlstellung einen vergrößerten *mLDFW*, so kann man von einer femoralen Fehlstellung als Ursache der Varusdeviation ausgehen, während ein verkleinerter *mMPTW* auf eine tibiale Deformität hinweist. Umgekehrt verhält es sich bei Valgusdeformitäten. Hier deutet ein vergrößerter *mMPTW* auf eine tibiale, ein kleinerer *mLDFW* auf eine femorale Achsendeviation hin (Abb. 11).

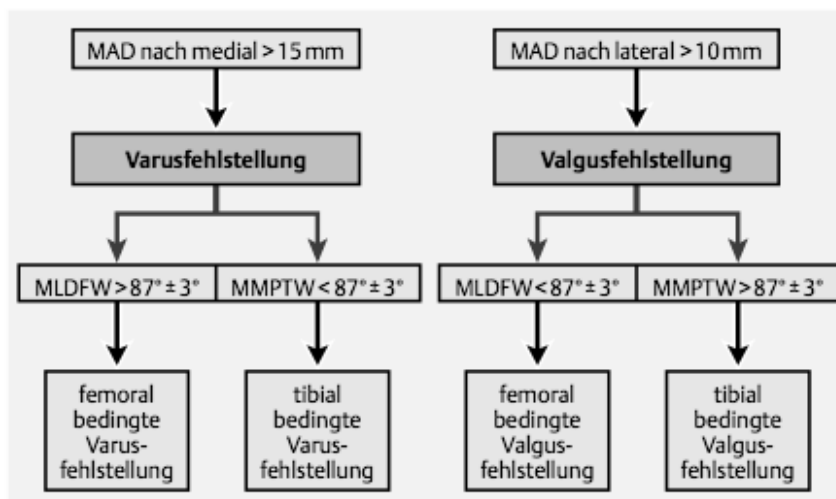


Abb. 11 Systematische Analyse einer Achsenfehlstellung mit dem Malalignment-Test nach Paley (Galla und Lobenhoffer 2007)

Klinisch wird das Ausmaß einer frontalen Beinachsdeviation über den Interkondylarabstand (IKA) bzw. den Intermalleolarabstand (IMA) definiert (Galla und Lobenhoffer 2007). Hefti et al. setzt die Grenze zur pathologischen Varusstellung bei einem IKA größer als zwei Zentimeter (Hefti 1997). De Brauwier und Moens sehen einen persistierenden IMA >10 cm über das 8. – 10. Lebensjahr hinaus als abklärungsbedürftige Valgusstellung an, während Courvoisier et al. bereits einen IMA > 8 cm als pathologisch definierten und eine Achsenkorrektur empfohlen (De Brauwier und Moens 2008.; Hernigou et al. 1987; Courvoisier, Eid und Merloz 2009).

1.9 Pathologische Bedeutung des Malalignments

Durch ein Malalignment in der Frontalebene kann es in allen Bereichen der unteren Extremität zu weitreichenden Veränderungen kommen. Während das Hüftgelenk eine Achsendeviation besser kompensieren kann, sind das Kniegelenk und das obere Sprunggelenk besonders gefährdet.

Im Kniegelenk kann es aufgrund von unphysiologischen Kraftübertragungen zu einer veränderten Druckverteilung zwischen dem medialen und lateralen Gelenkkompartiment kommen. Die Druckbelastung des medialen Kompartiments steht hierbei in einer linearen Beziehung zum tibiofemorale Winkel.

Je varischer der tibiofemorale Winkel, desto größer die mediale Druckbelastung (Hsu et al. 1990). Bei einem tibiofemorale Winkel von 6° Varus wird das mediale Kompartiment zu 100 % belastet, während die Belastung bei einer valgischen Beinachse von 6° nur noch bei 43 % liegt und damit geringer ist als lateral (Zhai et al. 2007; Hunter et al. 2007) (Abb. 12).

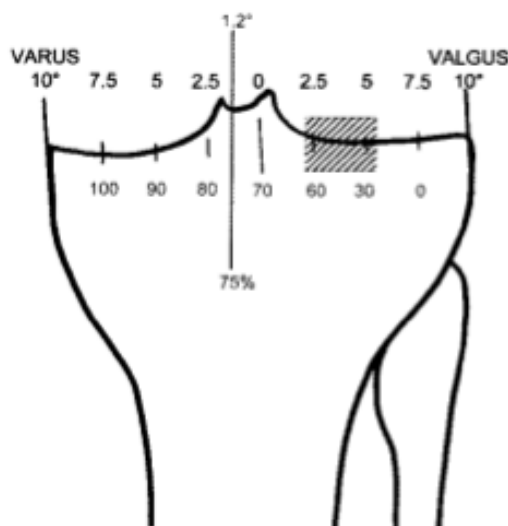


Abb. 12 Korrelation zwischen dem TFW und dem medialen Flächendruck (Zhai et al. 2007; Hunter et al. 2007)

Die veränderte Druckverteilung korreliert hierbei mit der Knorpeldicke bzw. dessen Verschleiß. Die Folge ist ein Substanzverlust, der das Risiko für präarthrotische Deformitäten erhöht oder eine bereits bestehende Arthrose aggraviert (Stevens 2007; Wiemann, Tryon und Szalay 2009; Strecker und Keppler 2014; Vogt, Schiedel und Rödl 2014; Wirtz und Zumteig 2011). Dies betrifft sowohl eine Valgusfehlstellung mit lateraler Arthrose als auch eine Varusfehlstellung mit voranschreitender medialer Gonarthrose, wobei die primäre Ursache der Achsendeviation zunächst keine Rolle spielt (Tanamas et al. 2009).

Umgekehrt gilt, dass eine bestehende Arthrose im Verlauf der Erkrankung durch insuffizient gewordene stabilisierende Kompartimente zu einer Progression der Achsendeviation führt (Canale und Christian 1990; Rauber und Kopsch 2003). Diese Tatsache unterstreicht die Bedeutung einer physiologischen Begradigung der Beine durch Achsenkorrektur nicht nur im Hinblick auf das Verhindern einer Gonarthrose, sondern auch auf eine Verlangsamung des Krankheitsverlaufs einer bereits bestehenden Gonarthrose (Gladbach und Pfeil 2000).

1.10 Ursachen kindlicher Achsendeviationen in der Frontalebene

Die primären Ursachen einer Achsendeviation des Kniegelenkes in der Frontalebene bei Kindern und Jugendlichen sind vielfältig. Wie bereits oben beschrieben, muss zwischen einer pathologischen und einer noch physiologischen Abweichung im Sinne des kindlichen Wachstums unterschieden werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Symmetrie der Kniegelenke. Eine symmetrische beidseitige Deformität ist meist idiopathisch oder durch starke Adipositas bedingt. Letzteres ist zunehmend auch bereits im Kindesalter ein durch alimentäre Faktoren bedingtes Problem. Bei einseitigen Deformitäten herrschen häufig sekundäre Ursachen vor, die eine wiederholte und lange Beobachtung des Kindes durch den betreuenden Arzt verlangen. Als sekundäre Ursachen kommen vor allem Schädigungen der Wachstumsfuge in Folge von Traumen, Infektionen, Tumoren oder Wachstumsstörungen in Frage. Pathogenetisch kommt es hier zu einer asymmetrischen Konsolidierung der Wachstumsfugen mit einer Verschiebung der Zugkräfte in eine Richtung. Ein wohlbekanntes Beispiel ist die metaphysäre Tibiafraktur, auch Biegungsfraktur genannt, die typischerweise in der Entwicklung eines Genu valgum mündet.

- kongenital	Fibulaaplasie/ -hypoplasie, Osteogenesis imperfecta, multiple kartilaginäre Exostosenkrankheit
- dysplastisch	Osteochondroplasien, fibröse Dysplasie, M. Ollier
- posttraumatisch	Verletzung der kniegelenksnahen Wachstumszonen
- metabolisch	Rachitis, Phosphatdiabetes
- postinfektiös	Wachstumszonenschädigung
- immunogen	rheumatoide Arthritis
- neoplastisch	Schädigung der Wachstumsfuge

Tab. 2 Ursachen kindlicher Achsendeviationen in der Frontalebene (Niethard 2010)

1.11 Behandlungsverfahren zur Korrektur von Achsfehlstellungen

1.11.1 Konservative Verfahren

Grundsätzlich lässt sich nach den oben genannten Erläuterungen eine Achsfehlstellung im Kindesalter zunächst expektativ verfolgen, da die Beinachse eine physiologische Entwicklung vom Varus über eine Valgusstellung zurück zu einer annähernd orthograden Stellung durchläuft. Sollten Beinachsenabweichungen behandlungsbedürftig sein, kommen auch nicht-operative Verfahren der Behandlung wie beispielsweise durch Einlagen, Schuhranderrhöhungen medial und lateral, Nachtlagerungsschienen und Orthesen in Frage. Die Anwendung ist abhängig vom Ausmaß der Beinfehlstellung und einer ggf. vorliegenden Grunderkrankung. Scheint eine konservative Therapie keine ausreichende Wirkung zu erzielen, kommen diverse operative Möglichkeiten der Achskorrektur in Frage.

1.11.2 Operative Verfahren

Das Verfahren der Epiphysiodese zur Korrektur von Beinachsendeformationen findet seit über 80 Jahren Anwendung und wurde gerade in den letzten Jahren zunehmend modifiziert und erweitert. Dabei ist der Sprung von den permanenten Verfahren der Wachstumslenkung hin zur temporären Epiphysiodese wohl als bedeutendster Schritt zu bezeichnen. Diese Entwicklung ist den Komplikationsraten und der nur schwer einzuschätzenden Entwicklung der Wachstumslenkung geschuldet. Ihre Hauptindikation findet die permanente Epiphysiodese nach wie vor in der Behandlung von Beinlängendifferenzen bei Kindern.

1.11.2.1 Permanente Verfahren

1933 etablierte Phemister ein permanentes und vergleichsweise invasives Verfahren zur Korrektur von jugendlichen Beinachsenfehlstellungen. Bei diesem wird ein Knochenblock, aus der Wachstumsfuge herausgemeißelt, die Fuge anschließend angebohrt und der Epiphysenknorpel hierüber vollständig entfernt.

Der entnommene Knochenkeil wird zu Defektdeckung abschließend um 180° rotiert wieder in den Knochen eingesetzt. (Canale und Christian 1990; Hasler 2000). Postoperativ durfte die betroffene Extremität im Ober- und Unterschenkelgips für vier Wochen nur teilbelastet werden (Bowen et al. 1985; Canale, Russell und Holcomb 1986). Durch die Entfernung des Fugenknorpels sollte eine Knochenbrücke geschaffen werden, die zur frühzeitigen Ossifikation der Wachstumsfuge führen sollte. Neben ausbleibenden Korrekturen hatte Phemister jedoch bei seinen Patienten vor allem mit kosmetisch ungünstigen Ergebnissen, Infektionen, lang andauernden postoperativen Schmerzen und dauerhaften Bewegungseinschränkungen zu kämpfen.

In den 1990er Jahren modifizierten Canale und auch Gabriel eine von Bowen entwickelte perkutane Technik zur permanenten Verödung der Wachstumsfuge (Ferrick, Birch und Albright 2004; Campens, Mousny und Docquier 2010; Stevens 2006). Das offene Verfahren von Phemister wurde nun abgelöst durch eine Methode, bei der die femorale und tibiale Wachstumsfuge aufgesucht und anschließend unter Bildwandlerdurchleuchtung mit einem breiten Bohrer fächerförmig angebohrt und schließlich perkutan auskürettiert wird. Im Vergleich zur Phemister-Prozedur war die Strahlenbelastung zwar höher, die Operationszeit dafür deutlich kürzer und die Vollbelastung konnte früher angestrebt werden bei deutlich geringeren postoperativen Frakturaten. Auch kam es aufgrund des weniger invasiven Verfahrens zu geringeren Infektionsraten und schmerzhaften Hämatomen. All diese Fortschritte konnten jedoch nicht darüber hinweg täuschen, dass das eigentliche Problem der permanenten Verödung ein schwierig zu bestimmender Operationszeitpunkt und ein nicht zu kontrollierender Wachstumstopp waren. Die Irreversibilität oben genannter Verfahren hatte bei ausbleibendem Wachstum oder asymmetrischem Wachstumsstopp häufig gegensteuernde und aufwendige Reeingriffe, wie die auch heute noch angewandten Umstellungsosteotomien zur Folge (Raab et al. 2001).

1.11.2.2 Temporäre Verfahren

Der Beginn der Verwendung temporärer Verfahren zur Wachstumslenkung kindlicher Kniegelenksfehlstellungen beruht auf einer zufälligen Beobachtung von Haas et al. Im Jahre 1945 konnte Haas zeigen, dass eine Drahtcerclage im Bereich der Wachstumsfuge des Kniegelenks zu einem verlangsamten Epiphysenwachstum führte, welches nach Entfernung der Cerclage wieder einsetzte (Haas 1945, 1948).

1.11.2.2.1 Blount-Staples

Auf der Tatsache der möglichen Wachstumslenkung durch temporären Wachstumsstop und scheinbar wiedereinsetzendes Knochenwachstum nach Metallentfernung aufbauend, stellte Blount im Jahre 1949 erstmals sein Verfahren der Wachstumslenkung durch die vorübergehende Klammerung einer Epiphysenfuge vor (Blount und Clarke 1971).

Zunächst benutzte Blount C-förmige rostfreie Stahlklammern von Burns, die er mittig über der Wachstumsfuge einsetzte. Später verwendete er Vitallium-Klammern, deren Komplikationsraten speziell im Hinblick auf Materialversagen sehr viel geringer waren. Diese Klammern gab es in zwei Größen, eine kleinere zur Korrektur der proximalen tibialen Epiphysenfuge, und eine größere für den distalen Femur. Pro Wachstumsfuge benutzte er zunächst nur eine Klammer, bemerkte aber schnell, dass der Wachstumsdruck des Knochens auf das Material zu groß war. Es kam zu Klammerbrüchen, Dislokationen und Klammerlockerungen (Zuege, Kempken und Blount 1979). Blount folgerte daraus, dass mehrere Klammern pro Fuge notwendig sind, um dem Druck des Knochens Stand zu halten. Dabei muss die Position jeder einzelnen Klammer korrekt bestimmt werden, um - beispielsweise im Hinblick auf die sagittale Ebene - das Ausbilden eines Genu recurvatum bzw. antevatum zu verhindern (Nouth und Kuo 2004). Darüber hinaus sollten die Klammern möglichst gewebeschonend implantiert und explantiert werden, da die eventuell nötige Reversibilität der Wachstumsblockade direkt abhängig ist vom Zustand des Periosts und der fugenversorgenden Blutgefäße (Ilharreborde et al. 2012). Raab et al. brachten

die Klammerdislokationen und Lockerungen später in direkten Zusammenhang mit dem Zeitpunkt bzw. dem Alter des Kindes bei Implantation.

Sie schlossen aus ihren Studien, dass eine Implantation der Blount-Klammern bei Jungen nicht vor dem 11., bei Mädchen nicht vor dem 9. Lebensjahr erfolgen sollte (Raab et al. 2001).

1.11.2.2.2 PETS (Percutaneous epiphysiodesis using transepiphyseal screws)

Metaizeau beschrieb 1998 ein neues Verfahren der temporären Epiphysiodese zur Behandlung von Beinachsenabweichungen (BAA) und Beinlängendifferenz (BLD). Die von ihm entwickelten gekreuzten und kanülierten Schrauben wurden zur Korrektur einer BLD nur einseitig, entweder femoral oder tibial eingebracht und sollten die damaligen Probleme mit der Blount-Klammer, wie beispielsweise Materialversagen, verhindern. Sie wurden über einen kleinen Hautschnitt durch die Epiphysenfuge gebohrt und kamen kurz vor der Artikulationsfläche von Femur und Tibia zu liegen (Abb. 12). Durch die Starre der Schraube sollte ein Materialversagen verhindert und gleichzeitig das weitere Wachstum verzögert werden. So zeigte sich bei einer Implantationszeit von 6 bis 18 Monaten eine durchschnittliche Wachstumsverzögerung von 89 % femoral und bis zu 95 % tibial. Nach Abschluss der Korrektur wurden die Schrauben entfernt. Im Anschluss zeigte sich anders als bei der Bohrung durch Phemister oder Canale ein Restwachstum der Epiphysenfuge. Aus dieser Tatsache zogen Metaizeau et al. den Schluss, dass PETS ebenfalls erfolgreich bei BAA eingesetzt werden können. Da die Studie aber zunächst nur für BLD gedacht war, konnten Metaizeau et al. nur für neun Patienten den erfolgreichen Einsatz der PETS zur Behandlung einer BAA zeigen. Ein Materialversagen konnte in keinem der Fälle beobachtet werden (Metaizeau und Wong- Chung 1998). Auch in späteren Studien konnte der erfolgreiche Einsatz von PETS zur Behandlung einer Beinachsendeviation in jugendlichem Alter gezeigt werden. Auffällig war, dass die Dauer der Korrektur bis zum Erreichen der angestrebten orthograden Beinachse durch einen späten Wirkeintritt relativ lang war. Dies hatte einerseits Schraubenbrüche durch Materialermüdung zur Folge, andererseits waren die Epiphysenfugen teilweise schon vor Erreichen der angestrebten Achse verschlossen (Nouth und Kuo 2004; Ilharreborde et al. 2012).

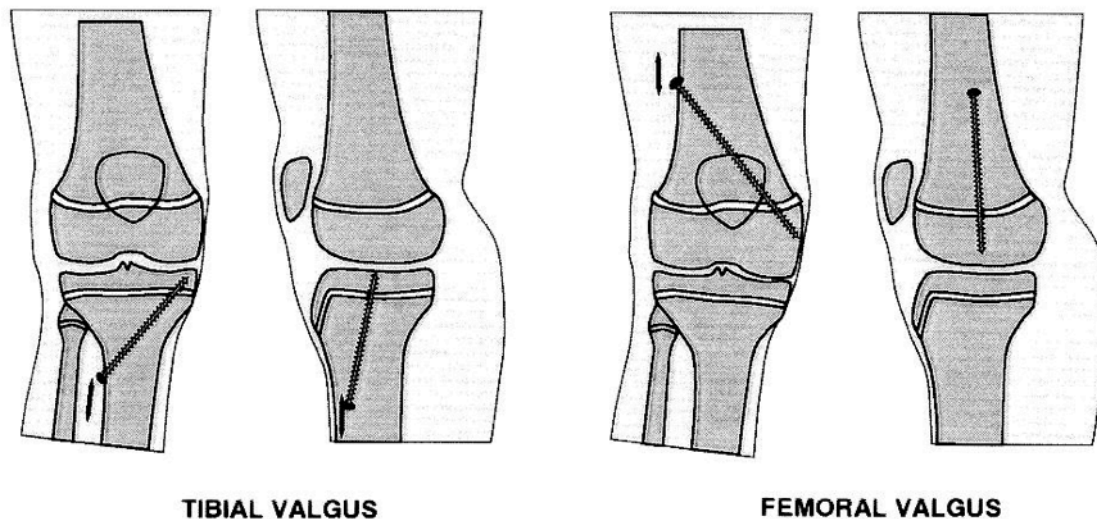


Abb. 13 Temporäre Epiphysiodese mittels PETS (Metaizeau und Wong- Chung 1998)

1.11.2.2.3 Temporäre Hemiepiphysiodese durch die Eight-Plate

Stevens stellte 2005 die Eight-Plate (Firma Orthofix GmbH, Valley) vor, eine in zwei unterschiedlichen Größen vorkommende Zwei-Loch-Titanplatte, die durch zwei nicht winkelstabile kanülierte Schrauben befestigt wird. Die Motivation zur Entwicklung der Platte war es, ein temporäres Korrekturverfahren zu entwickeln, das weniger Materialversagen und ein schnelleres Korrekturergebnis erzielen sollte. Das Prinzip der Zwei-Loch-Platte ist anders als bei den Blount-Staples nicht die Kompression der Fuge durch starre Klammern, sondern vielmehr eine individuelle Wachstumsführung, ein „guided growth“ durch eine einzige Plate pro Epiphysenfuge (Stevens 2007). Diese werden über 2-3 cm lange Hautschnitte mittels K-Drähten und kanülierten Schrauben über den Wachstumsfugen angebracht. Jeweils eine Schraube unter- bzw. oberhalb der Fuge fixiert die Platte außerhalb des Periosts (Abb. 13). Der extraperiostale Sitz der Platte soll dabei das Risiko der Ausbildung einer Knochenbrücke über dem Material verhindern und damit das Periost schonen, sowie die Entfernung der Platte bei Therapieende erleichtern (Burghardt et al. 2008). Durch die Beweglichkeit der Schrauben innerhalb der Platte wandern diese während des Fugenwachstums hin von einer parallelen zu einer divergierenden Lage. Hierdurch ergibt sich ein flexibler Drehpunkt, der so eine permanente Zuggurtung garantiert.

Die Folge ist eine im Vergleich zu den Blount-Staples effizientere und durch den längeren Hebelarm 30 % schnellere Achskorrektur (Radler, Ganger und Grill 2010). Hinzu kommt, dass durch die Beweglichkeit der Schrauben der Spannungsaufbau innerhalb der Platte reduziert und so das Risiko eines Materialversagens minimiert werden soll (Stevens 2007).

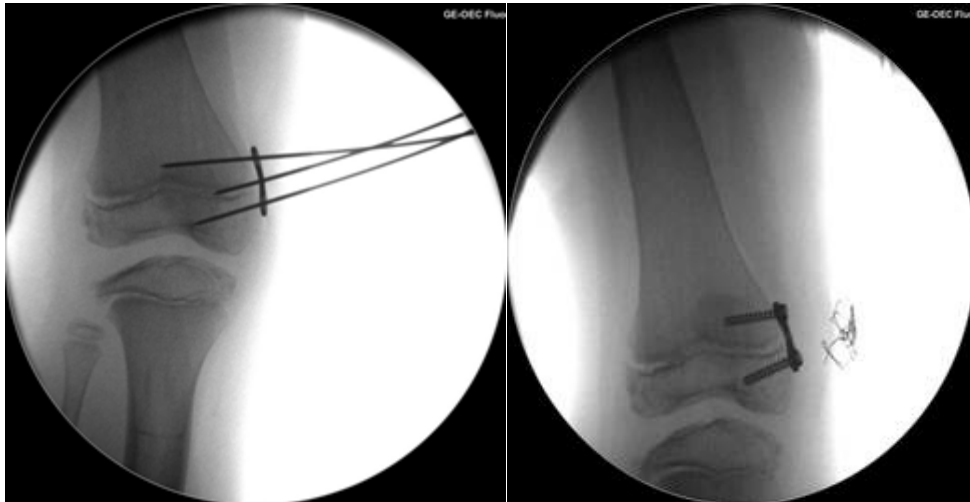


Abb. 14 Temporäre Epiphysiodese mittels Eight-Plate (Orthopädische Kliniken Volmarstein)

2 Zielsetzung der Dissertation

Im Rahmen temporärer Wachstumslenkungen bei jugendlichen Achsfehlstellungen in der Frontalebene konnte in der Vergangenheit das Reboundphänomen häufig beobachtet werden. Dieses beschreibt die Rückweichung der zuvor korrigierten Beinachse meist in Richtung der originären Fehlstellung nach Entfernung der Epiphysiodese-Platten. Die Folge des Rebounds kann so eine erneute Achsfehlstellung sein, die Revisionsoperation bis hin zu Umstellungsosteotomien mit sich bringen kann.

Durch die Analyse retrospektiver Daten der Kliniken Volmarstein von jugendlichen Patienten nach temporärer Wachstumslenkung soll das Verfahren der Epiphysiodese mittels Eight-Plate in seiner Effektivität, Sicherheit und möglicher Komplikationen bewertet werden.

Speziell die postoperative Komplikation des Rebounds soll im Hinblick auf dessen Auftretenshäufigkeit, dessen Ausmaß und möglicher Einflussfaktoren hin untersucht werden. Der Rebound an sich ist in dieser Arbeit als Veränderung der mechanischen Beinachse vor und nach Metallentnahme definiert und wird im Folgenden in Millimetern angegeben. Die Veränderung der Beinachse, soll durch den Vergleich von Ganzbeinstandaufnahmen in seiner Intensität und Richtung bewertet werden.

Durch den Vergleich klinischer und radiologischer Daten mit der MAD bzw. dem Rebound der MAD besteht die Vorstellung mögliche Einflussfaktoren für das Auftreten eines Rebounds nach Metallentfernung zu definieren und herauszustellen.

Im Anschluss könnten so Rückschlüsse im zukünftigen Umgang mit dem Reboundphänomen gezogen bzw. Therapieempfehlungen ausgesprochen werden.

3 Patienten und Methoden

3.1 Studiendesign

Es wurde eine retrospektive Studie anhand eines Patientenkollektives der Orthopädischen Klinik Volmarstein unter der Leitung von Dr. B. Leidinger durchgeführt. Der Beobachtungszeitraum bezog sich auf die Jahre 2007 bis 2016. Aus dem genannten Zeitraum wurden jugendliche Patienten ausgewählt, die aufgrund einer idiopathischen Achsendeviation in der Frontalebene mittels temporärer Epiphysiodese durch die Eight-Plate korrigiert worden waren und deren vollständige Datensätze vorlagen. Ein vollständiger Datensatz definierte sich aus den radiologischen und klinischen Angaben aus mindestens drei Untersuchungen. Hierfür mussten die Daten jeweils einer Untersuchung zum Zeitpunkt vor Implantation der Platten, vor Plattenexplantation und eine Nachuntersuchung nach Metallentfernung vorliegen. Zudem musste eine radiologische Untersuchung der linken Hand zur Bestimmung des Skelettalters vor Implantation der Epiphysiodese vorhanden sein. Anhand dieser vorher festgelegten klinischen und radiologischen Parameter wurde auf die oben genannte Fragestellung eingegangen.

3.2 Patientenkollektiv

Aus den vorliegenden Patientendateien der Klinik Volmarstein aus den Jahren 2007 bis 2016 konnten insgesamt 134 Patienten identifiziert werden, die aufgrund einer Achsendeviation in der Frontalebene mittels Eight-Plate behandelt wurden. Insgesamt wurden im genannten Zeitraum 276 Epiphysiodesen vorgenommen. Die Ursachen der Achsendeviationen waren in der Grundgesamtheit der Patienten unterschiedlich. So wiesen 26 Patienten eine nicht idiopathische Ursache ihrer Achsfehlstellung auf bzw. zeigten zusätzliche Begleiterkrankungen die einen möglichen Einfluss auf die Wachstumslenkung haben könnten. Fünf Patienten beispielsweise zeigten einen kindlichen Kleinwuchs bzw. Hochwuchs und wurden zusätzlich hormonell behandelt. Vier Patienten hatten bereits Umstellungsosteotomien der unteren Extremität in der

Vergangenheit erfahren aufgrund eines Morbus Perthes bzw. Wachstumslenkungen im Bereich des Kniegelenks nach Canale. Darüber hinaus entschieden wir uns zwei Patienten zu exkludieren, die nebenbefundlich eine ausgeprägte Lungengerüsterkrankung aufwiesen und zum Zeitpunkt der Wachstumslenkung hohe Kortisondosen einnahmen, sodass auch hier ein möglicher Einfluss auf die Wachstumslenkung nicht ausgeschlossen werden konnte. Weitere Patienten zeigten zusätzliche ausgeprägte neuroorthopädische Erkrankungen und Skelettdysplasien.

Letztlich konnten somit nur 106 der 134 Patienten identifiziert werden, die eine idiopathische Genese ihrer Achsfehlstellung aufwiesen. Voraussetzung zum Einschluss der Patienten in die Studie war neben der idiopathischen Genese der Achsfehlstellung ein vollständiger Datensatz wie oben beschrieben. Bei 46 Patienten konnte dies nicht realisiert werden, da die notwendigen Follow-Up Untersuchungen bzw. präoperative radiologische Untersuchung der linken Hand zur Bestimmung des Skelettalters nicht nachgewiesen werden konnten. Abschließend wiesen lediglich 60 Patienten die erforderlichen Einschlusskriterien auf. Von 60 Patienten wurden 48 Jugendliche an beiden Beinen korrigiert, während 12 Jugendliche lediglich eine einseitige Korrektur erfuhren. Der Großteil der Patienten wies ein pathologisches Genu valgum auf, lediglich 10 Patienten wurden aufgrund eines pathologischen Genu varum korrigiert.

Zum Zeitpunkt der Plattenimplantation waren die Patienten im Mittel 13,4 Jahre alt. Die jüngste Patientin war 10,9 Jahre, der älteste Patient knapp 15,9 Jahre alt. Der gewählte Implantationszeitpunkt der Epiphysiodese ergab sich aus dem biologischen Alter und dem radiologisch-rechnerisch bestimmten zu erwartenden Restwachstum der linken Hand nach Greulich/Pyle (Pyle und Greulich 1959) sowie dem Korrekturpotential der Eight-Plate unter Berücksichtigung vorausgegangener Studien (Burghardt et al. 2008). Die präoperativen Aufnahmen, die zur Planung des Operationszeitpunkts herangezogen wurden, waren dabei nicht älter als drei Monate zum Zeitpunkt der Operation, was dem gängigen Prozedere der kinderorthopädischen Abteilung des Klinikum Volmarstein entsprach und aufgrund des retrospektiven Designs nicht beeinflusst werden konnte.

Nach Implantation der Platten wurden die Patienten regelmäßig in der Kinderorthopädischen Sprechstunde der Klinik Volmarstein klinisch und radiologisch nachuntersucht. Nach Erreichen der angestrebten Achsenkorrektur, die sich an der

physiologischen Norm nach Paley et al. orientierte, wurden die Platten explantiert. Das durchschnittliche Alter bei Explantation lag bei 14,2 Jahren (min.: 11,9 / max.: 16,5). Die Zeit bis zur Kontrolle der Beinachse nach erfolgter Plattenentnahme betrug nach Auswertung der Daten durchschnittlich 17 Wochen. Insgesamt wurden im oben genannten Zeitraum des ausgesuchten Patientenkollektives 145 Platten operativ eingebracht.

3.3 Klinische Parameter

3.3.1 Indikation zur Epiphysiodese

Die Indikation zur Epiphysiodese mittels Eight-Plate der Firma Orthofix wurde aufgrund einer Achsabweichungen in der Frontalebene im Sinne einer dem Alter nicht entsprechenden physiologischen Norm nach Paley et al. gestellt (Paley und Herzenberg 2005).

3.3.2 Lokalisation der Epiphysiodese

Aus den vorliegenden Achsendeviationen der unteren Extremität ergaben sich vier mögliche Lokalisationen der Implantation einer Eight-Plate. Am distalen Oberschenkel waren dies die distal-laterale bzw. distal-mediale Fuge des Os femur. Am Unterschenkel konnten die Platten in die proximal-mediale bzw. proximal-laterale Fuge der Tibia eingebracht werden. Es wurde ausschließlich eine Platte pro Wachstumsfuge eingesetzt. Die Wahl der zu korrigierenden Epiphysenfuge wurde auf Grundlage des Malalignmenttests nach Paley getroffen (Paley und Pfeil 2000; Galla und Lobenhoffer 2007).

3.3.3 Chronologisches Alter

Es wurde jeweils das entsprechende Alter des Patienten zum Zeitpunkt der Implantation und zum Zeitpunkt der Materialentfernung festgehalten. In tabellarischer Form ergab sich hierfür die Nomenklatur „Alter zu OP bzw. Alter zu ME“.

3.3.4 Gewicht, Größe, Body-Mass-Index

Alle Patienten wurden zum Zeitpunkt der Implantation, der Metallentfernung und dem Zeitpunkt des Follow-ups gewogen und vermessen. Aus den vorliegenden Daten wurde der jeweilige Body-Mass-Index mittels unten genannter Formel errechnet:

$$\text{BMI} = m/l^2 \quad (m: \text{Körpermasse in Kilogramm} / l: \text{Körperlänge in Metern})$$

3.3.5 Korrekturzeitraum

Die Zeitspanne zwischen Implantation der Eight-Plate und der Metallentfernung ergab den Korrekturzeitraum. Bei Implantation mehrerer Platten an einer Extremität wurde der Korrekturzeitraum auf die jeweilige Platte bezogen.

3.3.6 Follow-up/ Nachuntersuchungszeitraum

Das Follow-up beschreibt die Zeitspanne zwischen der Metallentfernung und der ersten Nachkontrolle mittels klinischer bzw. radiologischer Untersuchung im Rahmen einer Ganzbeinstandaufnahme. Der Zeitraum bis zum Follow-up wurde vor Studienbeginn mit durchschnittlich drei Monaten veranschlagt.

3.4 Radiologische Parameter

Die zu untersuchenden Messwerte der Patienten wurden vor Studienbeginn festgelegt und ausschließlich aus radiologischen Daten der Orthopädischen Klinik Volmarstein gewonnen. Diese Daten ergaben sich aus Ganzbeinstandaufnahmen der Patienten, die zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten angefertigt wurden:

1. Implantation der Eight-Plate
2. Metallentfernung
3. Follow-up

Die Aufnahmen entstanden in standardisierten Einstelltechniken mit horizontal-anterior-posteriorem Strahlengang. Es wurde auf einen geraden Stand der Patienten sowie auf die vollständige Abbildung von Hüftgelenk, Kniegelenk und des oberen Sprunggelenks geachtet (Becht et al. 2008).

Voraussetzung für die korrekte Beurteilung und den Vergleich von Beinachsen mittels Ganzbeinaufnahmen war die parallele Ausrichtung der Femurkondylen zum Röntgenmedium. Erreicht wurde dies durch die ventrale Ausrichtung der Patellae bei neutraler Stellung beider Kniegelenke. Wichtigstes Qualitätsmerkmal war dabei die Zentrierung der Patellae zwischen den beiden Femurkondylen (Waldt, Eiber und Wörtler 2011).

Die Röntgenuntersuchung wurde mit einem Hochfrequenz-Röntgengenerator der Firma GE angefertigt.

Die anschließende Auswertung der Röntgenbilder inklusive der Vermessung unten genannter Winkel und Abstände wurde unter Anwendung der Software OsiriX 4.0 für Macintosh durchgeführt (Abb. 15).

3.4.1 Biologisches Alter

Das biologische Alter stellt ein indirektes Maß für den möglichen Beginn einer Achsenkorrektur in der Frontalebene dar und bestimmt somit den Zeitpunkt der Implantation der Eight-Plates. Es definiert indirekt auch das Korrekturpotential im Sinne eines Restwachstums. Wir fertigten zur Bestimmung des optimalen Beginns einer Achsenkorrektur eine radiologische Aufnahme der linken Hand an. Anschließend erfolgte die Bestimmung des biologischen Alters nach Greulich/Pyle (Pyle und Greulich 1959).

3.4.2 Mechanische Winkel und Abstände zur Beinvermessung

Anhand von Ganzbeinstandaufnahmen wurden zu den bereits genannten Zeiträumen die Kniegelenkwinkel und Beinachsen vermessen (s. Abb 8). Die jeweiligen Winkel und

Achsen wurden im Anschluss mit der Korrektur- bzw. dem Nachuntersuchungszeitraum in Monaten korreliert. Es ergaben sich somit Korrektur- bzw. Reboundpotentiale in mm/Monat bzw. Grad/Monat. Speziell die mechanische Achsendeviation wurde auf die oben genannte Fragestellung hin untersucht.

Folgende mechanische Winkel und Abstände wurden anhand digitaler Röntgenbilder berechnet und sind im Weiteren unter folgenden Synonymen verzeichnet:

mLDFW (= 88° nach Paley)	Mech. lateral-distaler Femurwinkel
mMPTW (= 87° nach Paley)	Mech. medial-proximaler Tibiawinkel
mTFW (= 1,3° +/- 2° nach Moreland et al.)	Mechanisch tibiofemoraler Winkel
MAD (= 9,7 mm +/- 6,8mm nach Paley)	mechanische Achsendeviation

Tab. 3 Verwendete Winkel und Achsen der unteren Extremität

3.5 Vergleich einzelner Parameter mit der radiologisch ermittelten MAD

Nachdem die klinischen Daten ermittelt und die radiologischen Parameter vermessen wurden, wurden die einzelnen klinischen Daten mit dem Rebound der MAD verglichen und statistisch korreliert. Es handelt sich um die folgenden Daten:

- a) Biologisches Alter
- b) Chronologisches Alter
- c) Gewicht präoperativ
- d) Größe präoperativ
- e) Korrekturzeitraum (Wochen)
- f) Nachuntersuchungszeitraum (Wochen)
- g) Absolute Korrektur (mm)

Hierfür wurden die jeweiligen Mittelwerte bestimmt und in der statistischen Auswertung zusätzlich standardisiert.

Für die jeweiligen Korrelationen wurden drei Gruppen gebildet und deren klinische Parameter mit dem Rebound der mechanischen Achsendeviation verglichen:

1. Gesamtkohorte
2. Kohorte Genu Varum
3. Kohorte Genu Valgum

Anmerkung: Keine der nachfolgenden Aufnahmen ist zum Zweck der Studie entstanden.

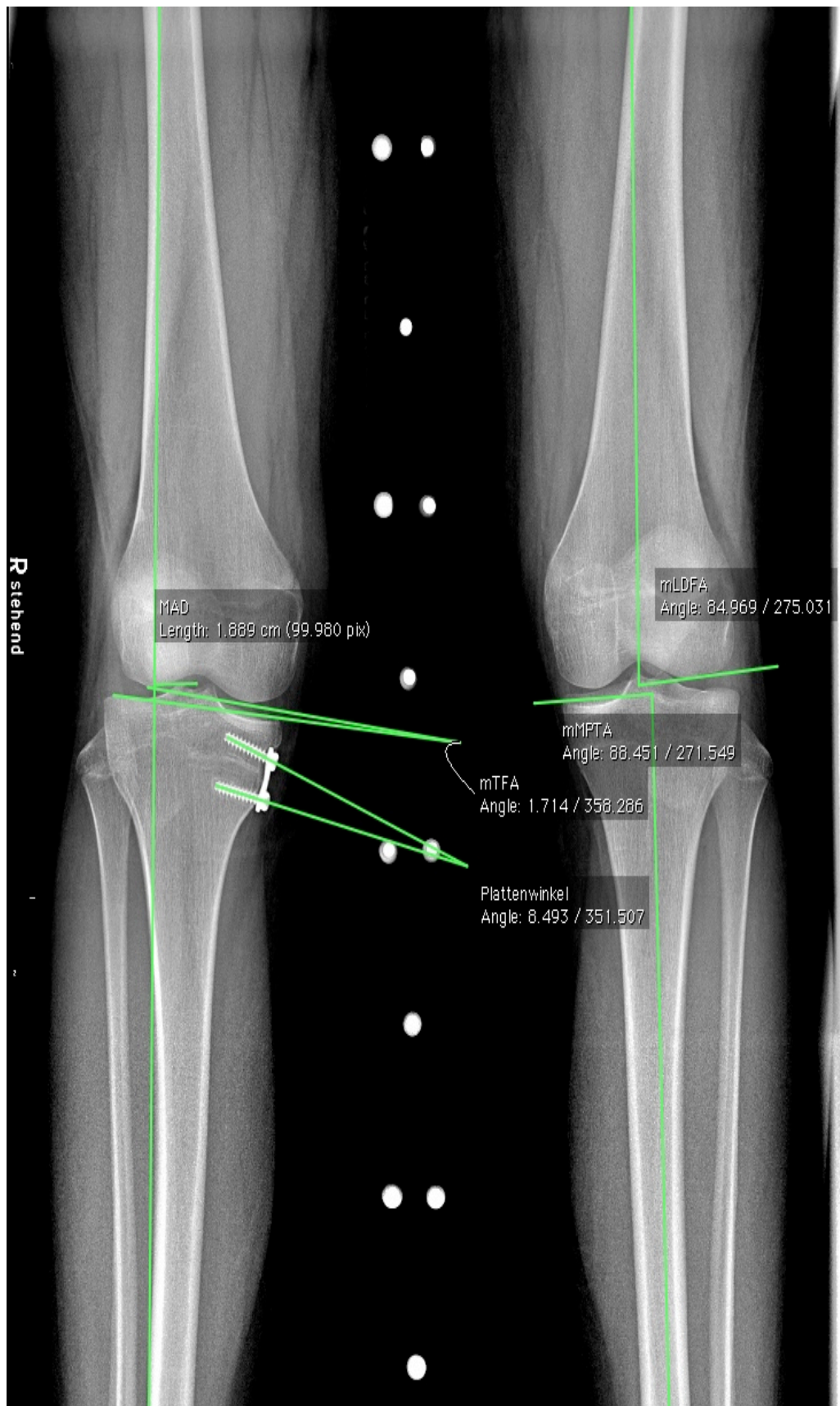


Abb. 15 Vermessung der Beinachse mit der Software OsiriX 4.0 für Macintosh (Orthopädische Kliniken Volmarstein)

3.6 Statistische Analyse

Die klinisch und radiologisch ermittelten Daten wurden fallbezogen für jeden Patienten zuordenbar nach Geburtsdatum und Geschlechtsmerkmal in ein Tabellenkalkulationsprogramm eingegeben. Hierfür wurde Microsoft Office Excel 2011 verwendet. Für alle metrischen Daten wurden Mittelwert, Maximum und Minimum sowie die Standardabweichung ermittelt. Die Ergebnisse wurden für jeden einzelnen Patienten prä- und postoperativ verglichen und die Patienten für die statistische Auswertung anschließend einer Gruppe mit gleicher Achsfehlstellung zugeordnet. Die beiden sich daraus ergebenden Gruppen wurden zunächst bezüglich ihrer Merkmalsausprägung auf statistische Vergleichbarkeit zu einem möglichen Rebound hin untersucht. Abschließend wurde untersucht, welche demographischen und klinischen Variablen den radiologisch ermittelten Rebound beeinflussen. Um sowohl zu berücksichtigen, dass die Prädiktoren untereinander teils stark korrelieren, als auch, dass einzelne Individuen mehrere Datenpunkte beisteuerten, wurde eine hierarchische Regression gerechnet. Hierarchische Regressionen sind robust gegenüber Verletzungen der Heteroskedastizität (Jacqmin-Gadda et al. 2007) und üblicherweise teststärker als ihr nicht-hierarchisches Pendant. Die statistische Auswertung wurde mit dem Statistikprogramm R (R Core Team 2017) und den Paketen lmer (Bates et al. 2015) und lmerTest (Kuznetsova 2016) vorgenommen. Der Zusammenhang der einzelnen Prädiktoren zum Rebound wurde außerdem graphisch illustriert. Die Abbildungen zeigen jeweils ein Streudiagramm des bivariaten Zusammenhangs zwischen Prädiktor und Rebound unter Berücksichtigung der anderen genannten Variablen im Sinne einer multivariablen Regressionsanalyse. Für die Genu Varum Gruppe wurde lediglich der bivariable Vergleich angestrebt und graphisch illustriert, da ein multivariabler Vergleich aufgrund der geringen Patientenzahl statistisch nicht sinnvoll erscheint. Im Hintergrund wird zudem die Regressionsgerade – basierend allein auf dem bivariaten Zusammenhang – und das Konfidenzintervall der Vorhersage dargestellt. Die Abbildungen sollen Richtung und Stärke des Zusammenhangs verdeutlichen. Entscheidend für die statistische Signifikanz ist jedoch das Ergebnis der hierarchischen Regression. Für alle verwendeten Tests wurde ein Konfidenzintervall von 95 % zugrunde gelegt. Ergebnisse wurden bei einem p-Wert $< 0,05$ als statistisch signifikant,



Abb. 17 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein)
c) Abschlussuntersuchung

3.7.2 Korrektur eines Genu Varum mittels Eight-Plate

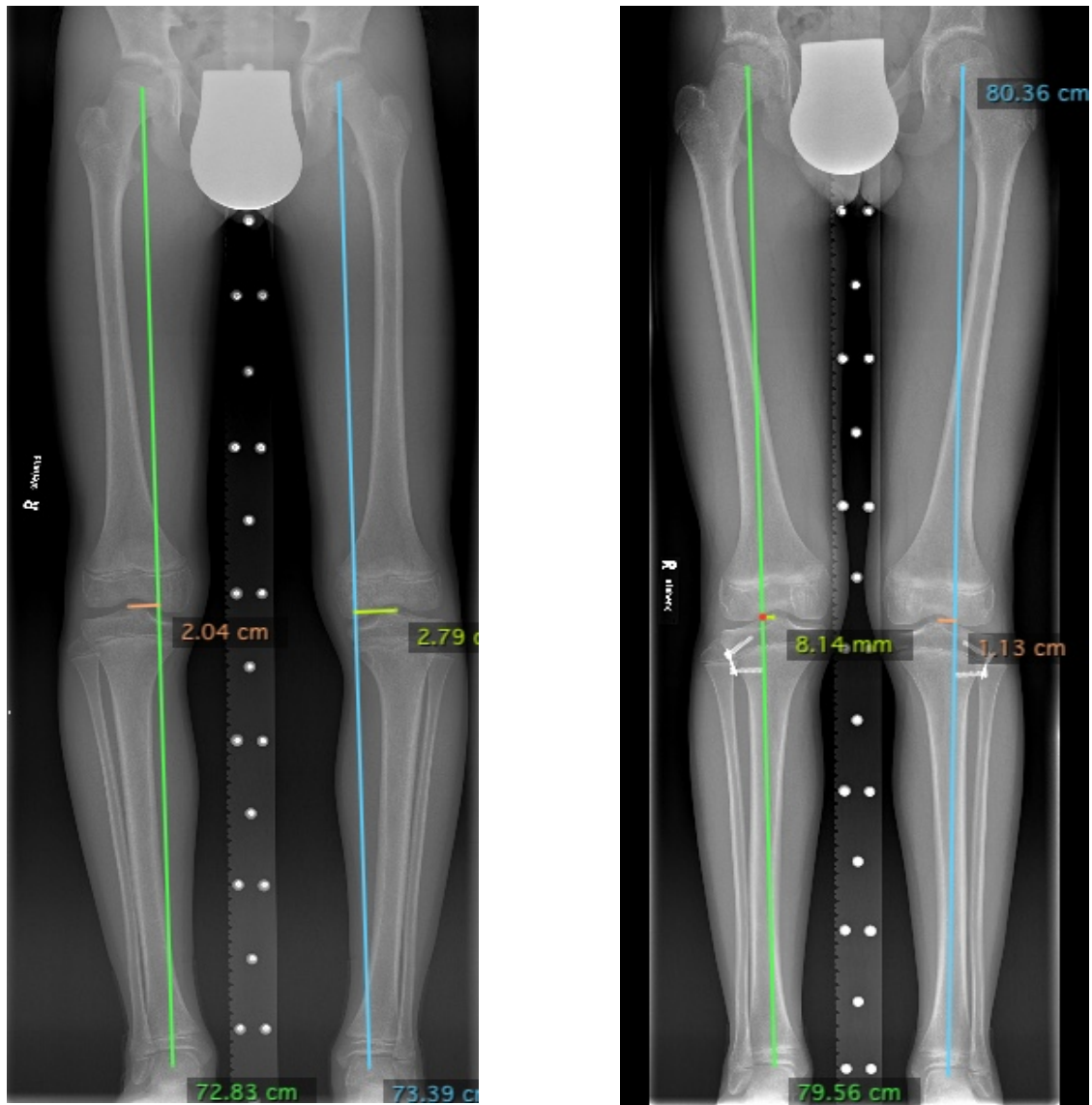


Abb. 18 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein)
a) präoperativ b) Verlaufskontrolle

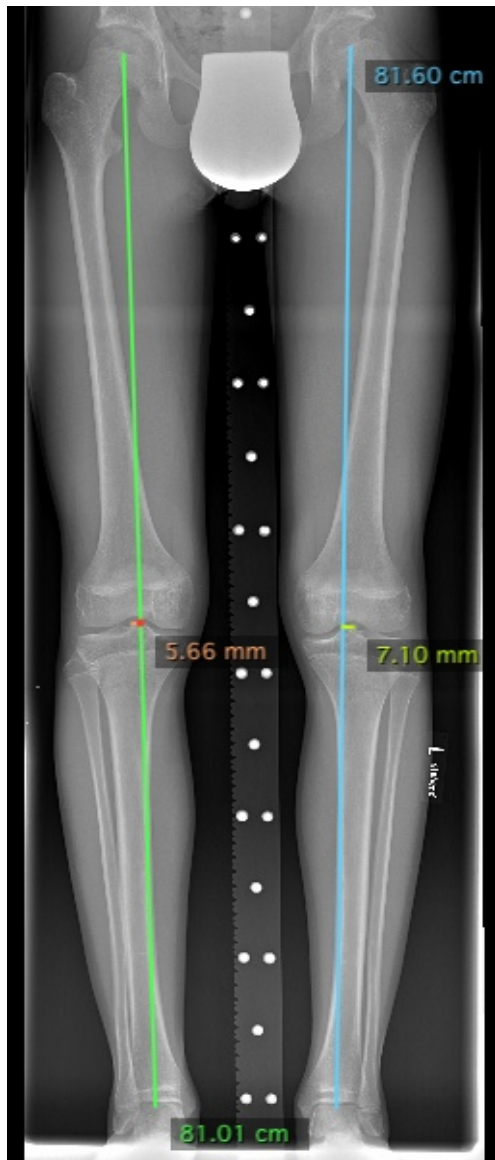


Abb. 19 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein)
c) Abschlussuntersuchung

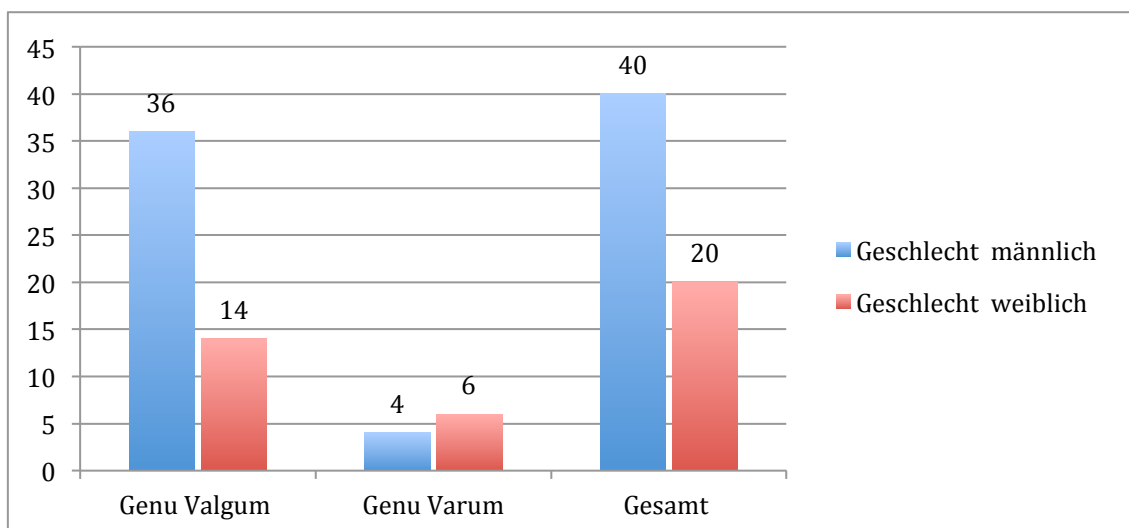
4 Ergebnisse

4.1 Klinische Parameter

4.1.1 Indikation zur Epiphysiodese

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten jugendlicher Patienten der Klinik Volmarstein retrospektiv ausgewertet. Alle Patienten waren zuvor aufgrund von Achsenabweichungen in der Frontalebene durch eine temporäre Epiphysiodese mittels Eight-Plate behandelt worden. Die Indikation zur operativen Therapie wurde jeweils aufgrund von klinischen Beschwerden in Korrelation mit den Ergebnissen der klinischen Untersuchungen und radiologischen Vermessungen von Ganzbeinstandaufnahmen gestellt.

Die Gesamtkohorte umfasste 60 Patienten. Zehn Patienten (6 weibliche, 4 männliche) wurden aufgrund eines pathologischen Genu varum behandelt. 50 Patienten erhielten eine temporäre Epiphysiodese aufgrund eines pathologischen Genu valgum, wovon 36 männlichen und 14 weiblichen Geschlechts waren (Diagr. 1).



Diagr. 1 Geschlechterverteilung unter Berücksichtigung der Achsenfehlstellung

4.1.2 Lokalisation der Epiphysiodese

Abhängig von der initialen Achsfehlstellung erfolgte die Korrektur der Epiphysenfugen ausschließlich um das Kniegelenk. Hierfür ergaben sich vier mögliche Positionen:

- a) Femur distal medial
- b) Femur distal lateral
- c) Tibia proximal medial
- d) Tibia proximal lateral

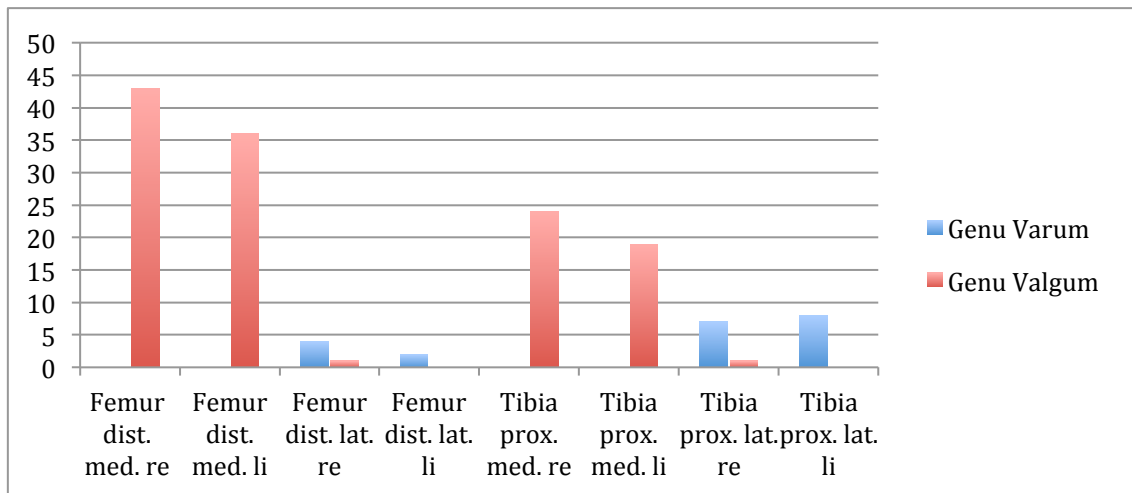
Insgesamt wurden 145 Eight-Plates eingebracht. In der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum wurden 124 Platten verwendet, 80 am distalen Femur und 44 an der proximalen Tibia. Bei einem Patienten erfolgte auf Grund einer Überkorrektur ins Genu varum eine erneute Epiphysiodese des rechten Beines lateralseitig tibial und femoral.

In der Genu varum Kohorte wurden insgesamt 21 Platten eingesetzt, wovon sechs Platten lateral am distalen Femur und 15 Platten an der proximalen Tibia eingesetzt wurden.

Insgesamt wurden 80 der oben genannten 145 Platten am rechten und 65 Eight-Plates am linken Bein eingebracht (Tab. 5).

	Genu Varum	Genu Valgum	Gesamt
Femur dist. med. re	0	43	43
Femur dist. med. li	0	36	36
Femur dist. lat. re	4	1	5
Femur dist. lat. li	2	0	2
Tibia prox. med. re	0	24	24
Tibia prox. med. li	0	19	19
Tibia prox. lat. re	7	1	8
Tibia prox. lat. li	8	0	8
Gesamt	21	124	145

Tab. 4 Lokalisation der Epiphysiodese



Diagr. 2 Vergleich der Lokalisation der Epiphysiodese

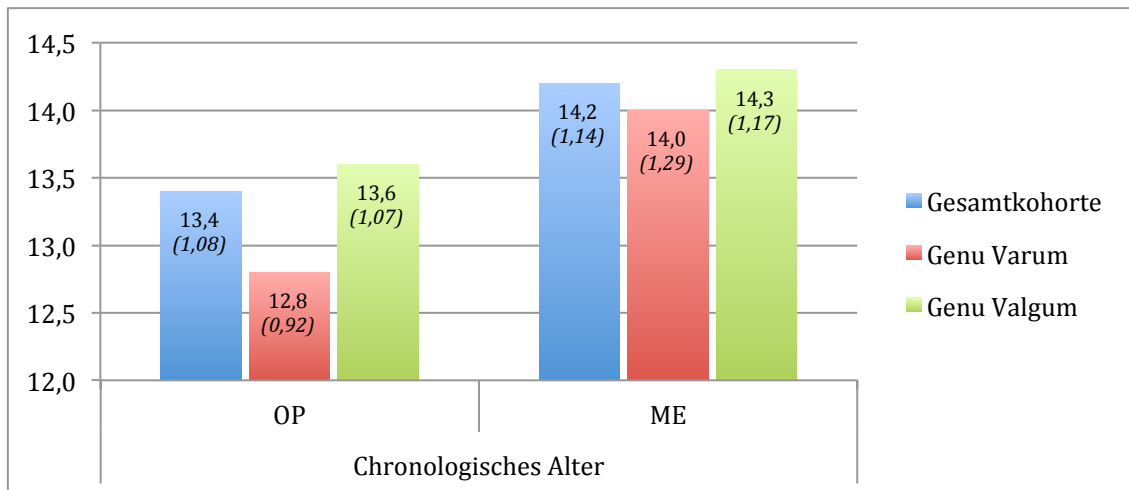
4.1.3 Chronologisches Alter

Das durchschnittliche Lebensalter aller Patienten betrug zum Zeitpunkt der Implantation der Eight-Plates 13,4 Jahre bei einem maximalen Alter von 15,9 Jahren und einem minimalen Alter von 10,9 Jahren.

Zum Zeitpunkt der Metallentfernung waren die Patienten der Gesamtkohorte durchschnittlich 14,2 Jahre alt. Ein Patient war bereits 16,5 Jahre alt, drei weitere Patienten waren zum Zeitpunkt der Plattenentnahme erst 11,9 Jahre alt.

Die Patienten mit einem Genu varum waren zum Zeitpunkt der Operation im Mittel 12,8 Jahre und bei Metallentfernung durchschnittlich 14 Jahre alt.

In der Gruppe der Patienten mit einem Genu valgum war das Durchschnittsalter bei Implantation der Eight-Plates 13,6 Jahre und bei Metallentfernung 14,3 Jahre.



Diagr. 3 Verteilung des chronologischen Alters in Jahren, *Mittelwert (SD)*

4.1.4 Gewicht, Größe, Body-Mass-Index

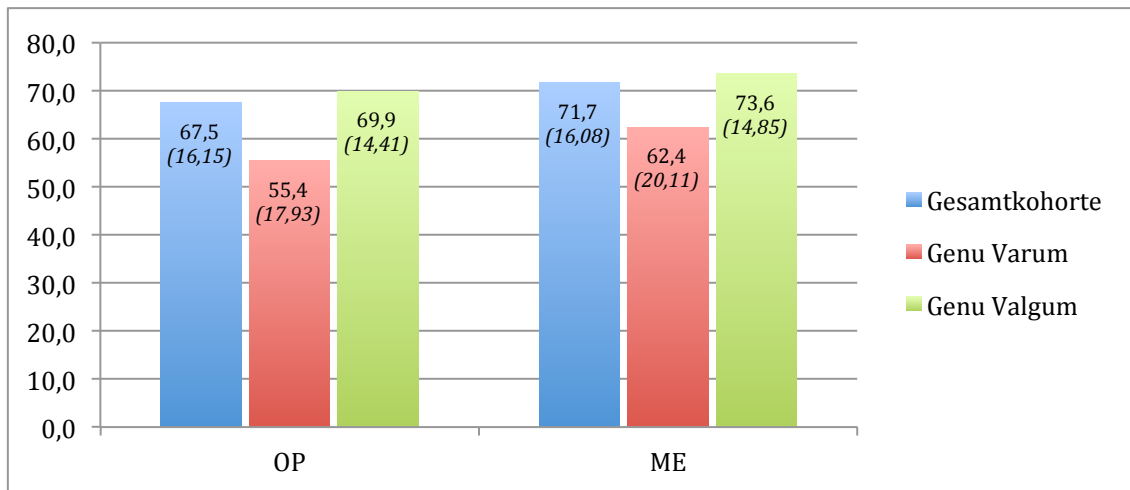
Das durchschnittliche präoperativ gemessene Gewicht lag bei 67,5 +/- 16,75 Kilogramm. Das maximale Gewicht bei Implantation waren 110 Kilogramm, das minimale Gewicht lag bei 29 Kilogramm.

Zum Zeitpunkt der Metallentfernung waren die in der Studie eingeschlossenen Patienten im Schnitt 71,7 +/- 16,9 Kilogramm schwer. Der schwerste Patient wog 105 Kilogramm. Der geringste gemessene Wert zum Zeitpunkt der Explantation waren 29 Kilogramm.

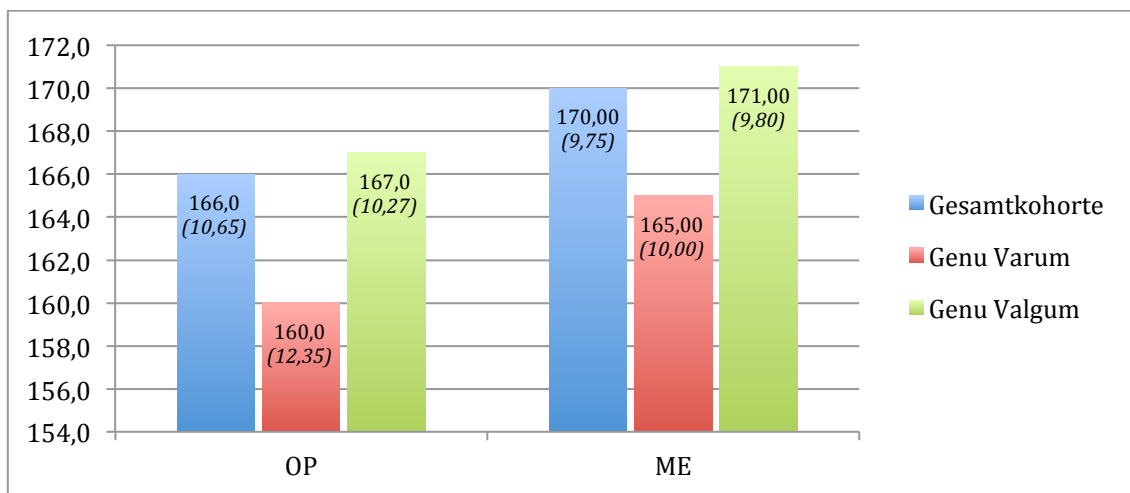
Zusätzlich zum Körpergewicht wurde zum Zeitpunkt der Implantation und Explantation die Körpergröße der Patienten ermittelt. Die durchschnittliche Körpergröße bei Implantation war 166 +/- 11 Zentimeter. Der größte Patient war 191 Zentimeter groß, der kleinste Patient war 138 Zentimeter groß.

Aus dem oben ermittelten Gewicht und der Größe der Patienten bei Implantation und zum Zeitpunkt der Metallentfernung errechnet sich ein durchschnittlicher BMI von 24 +/- 4,7 präoperativ (Maximum 38 / Minimum 13,6).

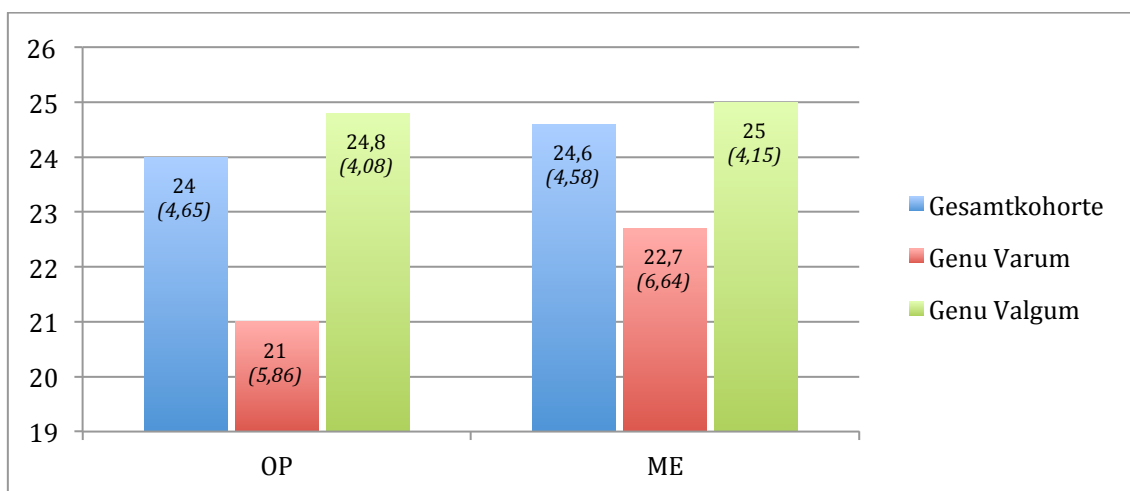
Bei Metallentfernung ergab sich ein durchschnittlicher BMI von 24,6 +/- 4,7 (Maximum 35,6 / Minimum 14,4).



Diagr. 4 Verteilung des Körpergewichts in Kilogramm, *Mittelwert (SD)*



Diagr. 5 Verteilung der Körpergröße in Zentimeter, *Mittelwert (SD)*



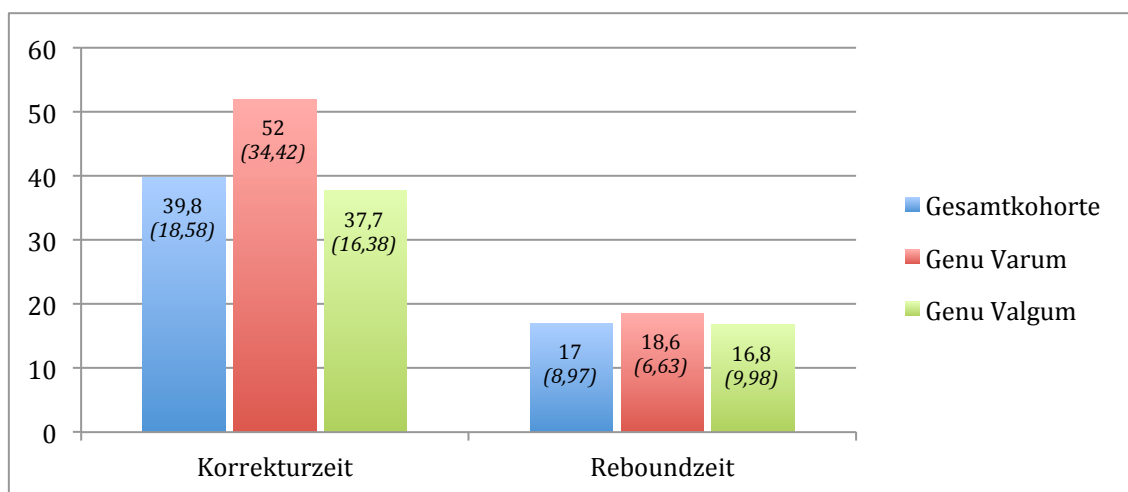
Diagr. 6 Verteilung des BMI in Kilogramm/m², *Mittelwert (SD)*

4.1.5 Korrekturzeitraum

Die Zeitspanne zwischen Implantation und Metallentfernung lag in der Gesamtkohorte im Mittel bei 40 +/- 20 Wochen. Die maximale Dauer bis zur Entnahme der Platten betrug 144 Wochen. Bei einem Patienten wurde die angestrebte Korrektur bereits nach 14 Wochen erreicht und die Platten wieder entnommen.

4.1.6 Nachuntersuchungszeitraum (Follow-up/Reboundzeit)

Die Zeitspanne zwischen Plattenentnahme und der klinisch-radiologischen Nachuntersuchung betrug durchschnittlich 17 +/- 19 Wochen. Der längste Zeitraum bis zur ersten Nachuntersuchung lag bei 59 Wochen. Eine Patientin wurde bereits eine Woche nach Metallentfernung radiologisch nachuntersucht. Der Grund hierfür ist nicht bekannt. Eine erneute Untersuchung zu einem späteren Zeitpunkt fand nicht statt.



Diagr. 7 Korrektur- bzw. Nachuntersuchungszeiträume in Wochen, *Mittelwert (SD)*

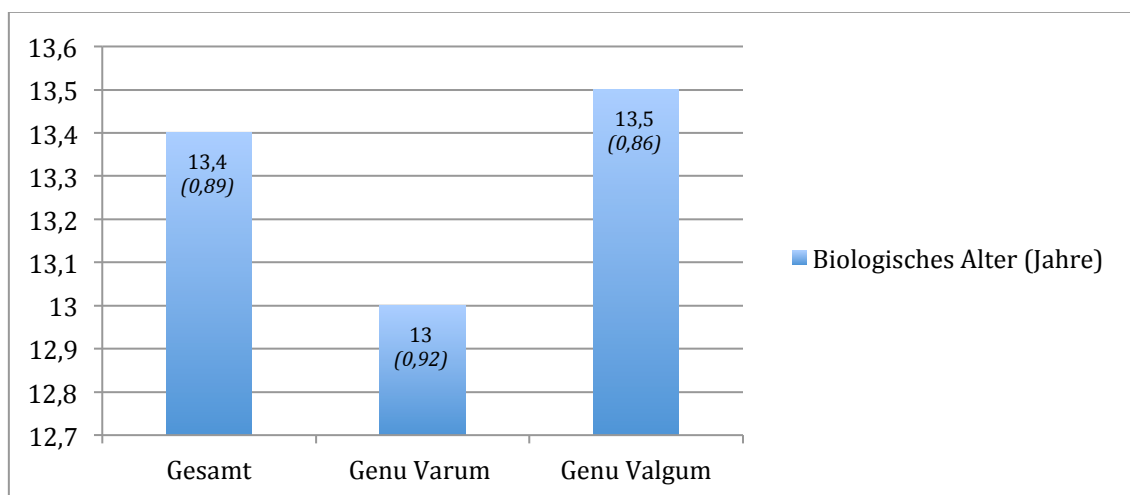
	Chron. Alter		Körpergewicht		Körpergröße		BMI	
	OP	ME	OP	ME	OP	ME	OP	ME
Gesamt- kohorte	13,48	14,32	68,31	73,88	166,27	170,91	24,49	25,17
	1,08	1,14	16,16	16,08	10,66	9,75	4,65	4,58
Genu- varum	12,82	14,13	53,08	61,57	159,08	164,58	20,77	21,94
	0,92	1,29	17,93	20,11	12,35	10,00	5,86	6,64
Genu- valgum	13,56	14,35	71,15	76,36	167,85	172,37	25,12	25,63
	1,07	1,17	14,41	14,85	10,27	9,80	4,08	4,15

Tab. 5 Übersicht der Anamnesedaten nach Kohorten (Mittelwert; *SD*)

4.2 Radiologische Parameter

4.2.1 Biologisches Alter

Das durchschnittliche Knochenalter, bestimmt durch eine radiologische Aufnahme der linken Hand, lag bei 13,4 Jahren für die gesamte Kohorte. Der älteste Jugendliche war präoperativ bereits 15,9 Jahre alt, der Jüngste erst 10,9 Jahre alt. In der Gruppe der Patienten mit Genu varum ergab sich ein Altersdurchschnitt von 13 Jahren und in der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum zeigte sich zu Beginn der Behandlung ein durchschnittliches Skelettalter von 13,5 Jahren.



Diagr. 8 Biologisches Alter in Jahren, *Mittelwert (SD)*

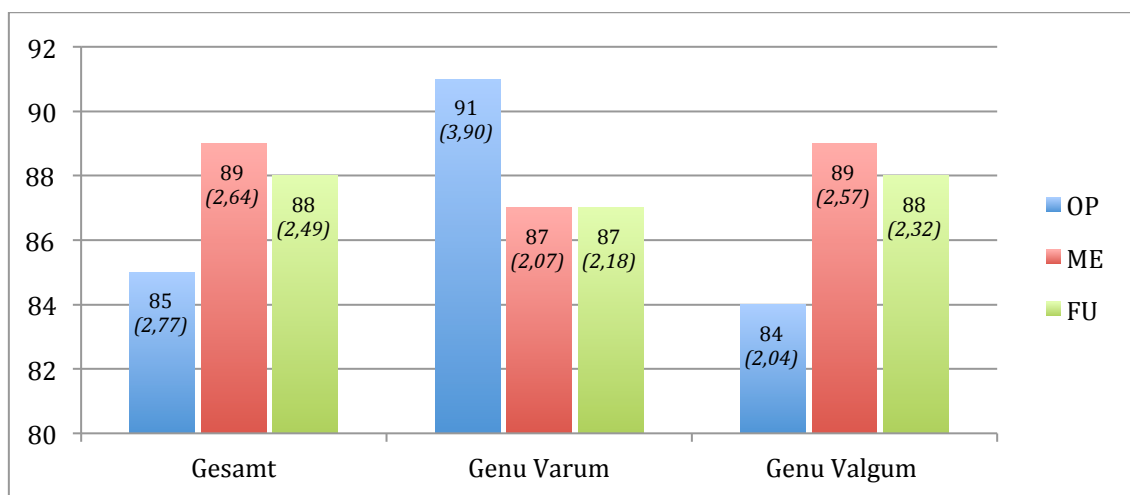
4.2.2 Mechanische Winkel und Abstände zur Beinvermessung

4.2.2.1 Mechanischer lateral-distaler Femurwinkel (mLDFW)

Für die gesamte Kohorte ergab sich präoperativ ein durchschnittlicher mechanisch lateral-distaler Femurwinkel (mLDFW) von 85°. Zum Zeitpunkt der Metallentfernung und der Nachkontrolle lag dieser jeweils bei 89°. Die durchschnittliche Korrektur umfasste 4,46°. Dies entsprach einer durchschnittlichen Korrektur von 0,52° pro Monat. Der durchschnittliche Rebound betrug 1,15°. Dies entsprach einem Rebound von 0,35° pro Monat.

Für die Patienten mit einem Genu valgum ergab sich präoperativ ein durchschnittlicher Winkel von 84°. Zum Zeitpunkt der Metallentfernung betrug dieser 89°. Dies entsprach einer durchschnittlichen Korrektur von 4,49° und 0,52° pro Monat. Nach Metallentfernung zeigte sich in der Nachuntersuchung ein Winkel von 88°, was einem durchschnittlichen Rebound von 1,17°, was 0,36° pro Monat entsprach.

Patienten mit einer Achsendeviation im Sinne eines Genu varum zeigten präoperativ durchschnittlich einen Winkel von 91°. Zum Zeitpunkt der Metallentfernung betrug dieser 87°. In der Nachuntersuchung lag dieser bei 87°. Die durchschnittliche Korrektur betrug 4,2°, entsprechend einer Korrektur von 0,52° pro Monat (Diagr. 9).

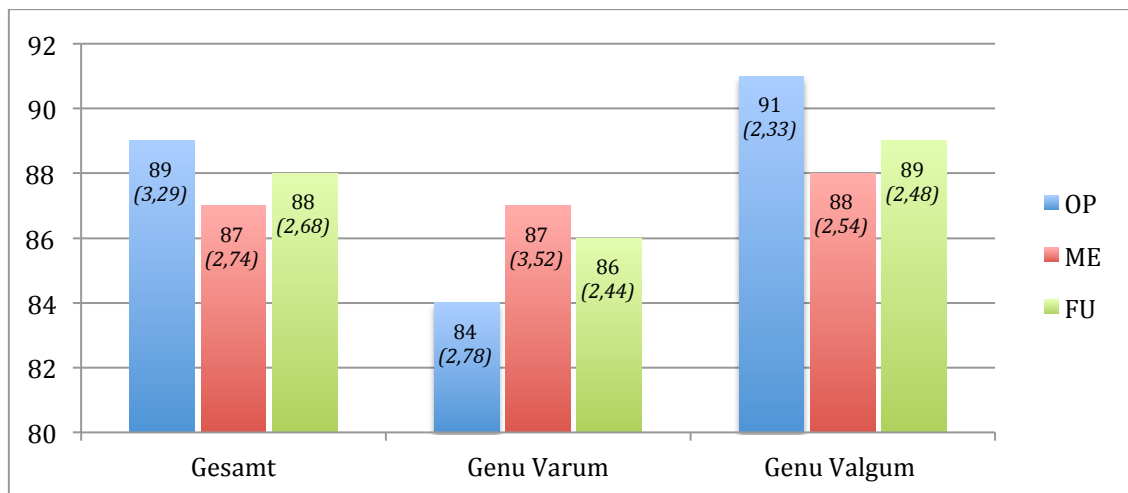


Diagr. 9 Entwicklung des mLDfW in Winkelgrad, *Mittelwert (SD)*

4.2.2.2 Mechanischer medial-proximaler Tibiawinkel (mMPTW)

Der präoperative Winkel lag für die Gesamtkohorte bei 89° (min. 76°/max. 96°). Zum Zeitpunkt der Metallentfernung zeigte sich ein Winkel von 87° und in der ersten Nachuntersuchung lag dieser bei 88°. Dies entsprach einer durchschnittlichen Korrektur von 4,1° bzw. 0,5° pro Monat. Der Rebound lag bei 1,7° bzw. 0,4° pro Monat. Für die Patienten mit einem Genu varum zeigte sich präoperativ ein Winkel von 84° bzw. 87° bei Metallentfernung und 86° zum Zeitpunkt der ersten Nachuntersuchung. Dies entsprach einer Korrektur von 4° bzw. 0,3° pro Monat.

Die Gruppe mit einem Genu valgum zeigte einen mMPTW von 91° präoperativ und 88° zum Zeitpunkt der Metallentfernung. In der Nachuntersuchung lag dieser bei 89°. Die durchschnittliche Korrektur lag bei 4,1° bzw. 0,6° pro Monat (Diagr. 10).



Diagr. 10 Entwicklung des mMPTW in Winkelgrad, *Mittelwert (SD)*

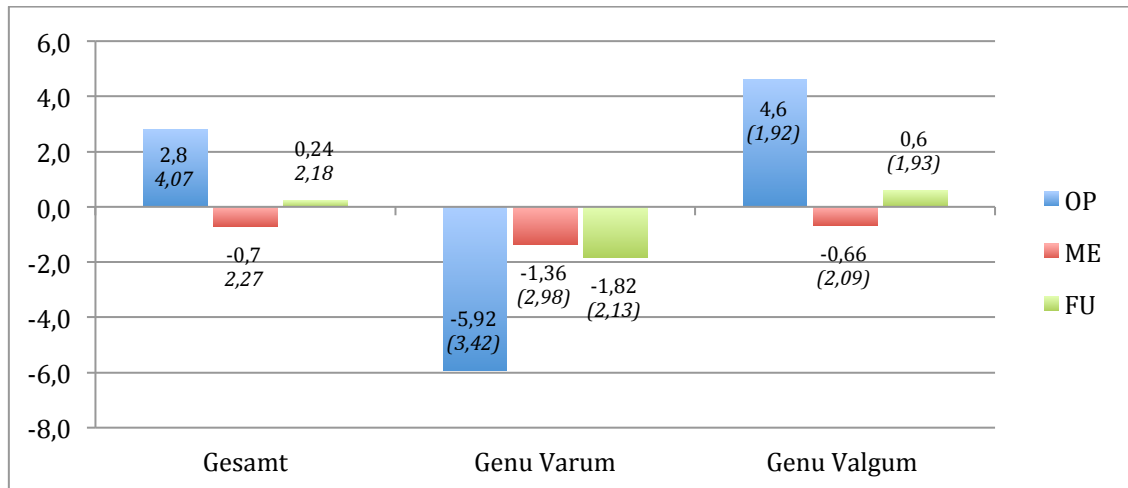
4.2.2.3 Mechanischer tibiofemoraler Winkel

Der mechanisch tibiofemorale Winkel betrug für die gesamte Kohorte präoperativ 2,8° valgum. Zum Zeitpunkt der Metallentfernung lag dieser bei 0,7° varum und in den ersten Nachkontrollen bei 0,24° valgum. Dies entsprach einer Korrektur von durchschnittlich 4,9° bzw. 0,55° pro Monat.

In der Kohorte mit Genu varum betrug der mTFW präoperativ im Durchschnitt 5,92° varum. Bei Metallentfernung betrug dieser 1,36° varum und zum Zeitpunkt der Nachkontrolle 1,82° varum. Dies entsprach einer Korrektur von 4,3° bzw. 0,39° pro Monat. Der durchschnittliche Rebound lag bei 1,55°, entsprechend einem Rebound von 0,4° pro Monat.

Der präoperative mechanische tibiofemorale Winkel in der Kohorte mit einem Genu valgum betrug 4,6° valgum. Nach einer durchschnittlichen Korrektur von 4,9° bzw. 0,58° pro Monat betrug der durchschnittliche mTFW bei Metallentfernung 0,66° varum. In der ersten Nachuntersuchung lag dieser im Durchschnitt bei 0,6° valgum.

Dies entsprach einem durchschnittlichen Rebound von $1,97^\circ$ bzw. $0,6^\circ$ pro Monat (Diagr. 11).



Diagr. 11 Entwicklung des mTFW in Winkelgrad, *Mittelwert (SD)*

4.2.2.4 Mechanische Achsendeviation

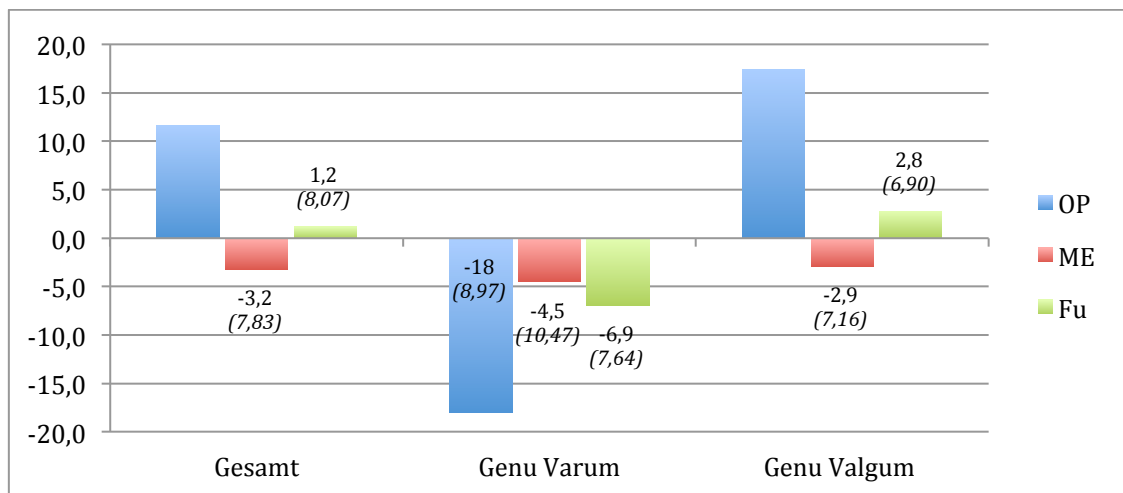
Die mechanische Achsendeviation betrug für alle Patienten präoperativ im Mittel 11,6 mm nach lateral. Durch die o.g. Korrekturen konnte vor Metallentfernung ein durchschnittlicher Abstand zur Mikulicz-Linie von 3,2 mm medial erreicht werden. Nach Entfernung der Eight-Plates lag der durchschnittliche messbare Abstand 1,2 mm lateral. Die durchschnittlich berechnete Korrektur war 18,7 mm bzw. 2,1 mm pro Monat.

In der Gruppe der Patienten mit Genu varum lag die präoperativ gemessene MAD bei 18 mm medial. Sie konnte bis zur Metallentfernung auf 4,5 mm medial korrigiert werden. Nach Entfernung der Platten zeigte sich ein Abstand von 6,9 mm medial der Mikulicz-Linie. Die durchschnittliche Korrektur betrug 15,6 mm bzw. 1,35 mm pro Monat. Die Patienten mit einem Genu varum präoperativ zeigten einen Rebound von 4,2 mm im Schnitt, respektive 0,74 mm pro Monat.

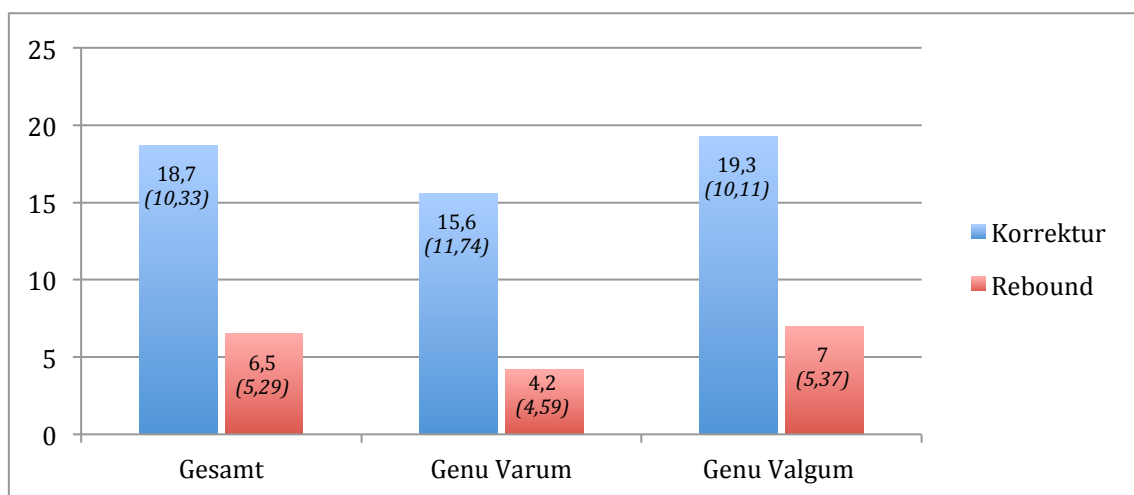
Die Patienten, die aufgrund einer Achsendeviation im Sinne eines Genu valgum operiert wurden, zeigten präoperativ im Mittel eine MAD von 17,4 nach lateral.

Nach einer durchschnittlichen Korrektur von 19,3 mm bzw. 2,28 mm pro Monat lag die MAD vor Metallentfernung bei 2,9 mm medial.

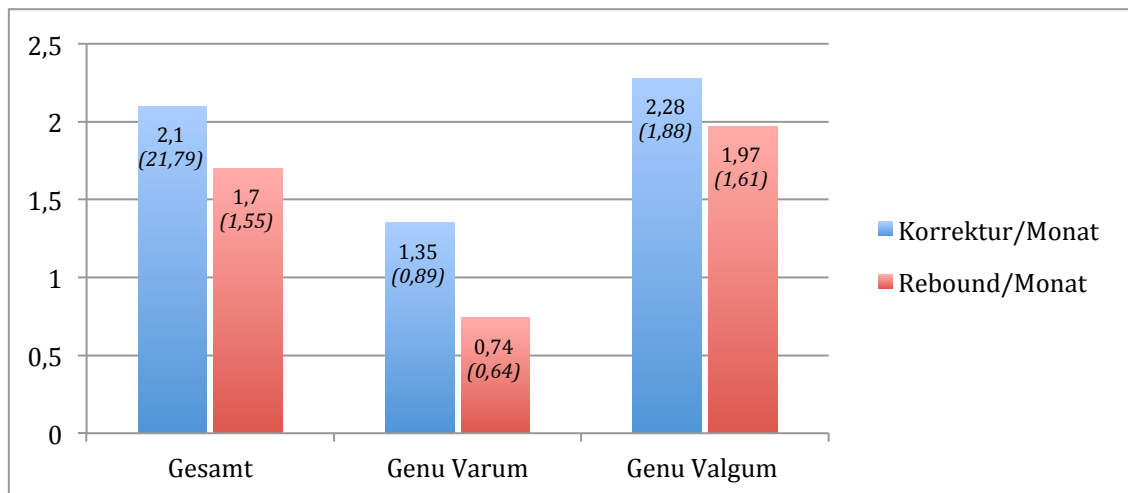
Zum Zeitpunkt der Nachkontrolle konnte ein Abstand von 2,8 mm lateral der Mikulicz-Linie ermittelt werden. Dies entsprach einem durchschnittlichen Rebound von 7 mm bzw. 1,97 mm pro Monat (Diagr. 12-14).



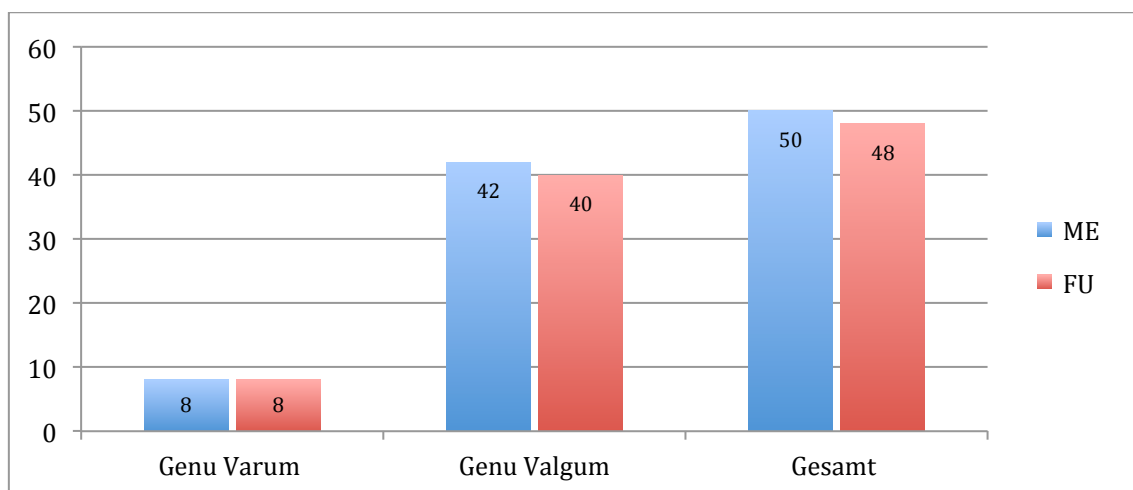
Diagr. 12 Entwicklung der mechnischen Achsendeviation in Millimetern, *Mittelwert (SD)*



Diagr. 13 Korrektur bzw. Rebound der mechanischen Achsendeviation in Millimetern, *Mittelwert (SD)*



Diagr. 14 Korrekturpotentiale der mechanischen Achsendeviation in Millimetern pro Monat, *Mittelwert (SD)*



Diagr. 15 Anzahl der Patienten in der radiologischen Norm nach Paley bzw. Galla u. Lobenhoffer gemessen an der mechanischen Achsendeviation

mLDFW	PräOP	ME	FU	Korrektur	Korrektur/ Monat	Rebound	Rebound/ Monat
Gesamt- Kohorte	85	89	88	4,46	0,52	1,15	0,35
	80	83	80	12,7	1,67	4,5	2,3
	100	96	94	0	0,01	0	0
	2,77	2,64	2,49	2,69	0,32	0,92	0,87
Genu varum	91	87	87	4,2	0,52	0,78	0,29
	83	84	84	9,3	0,18	0	0
	100	90	90	0,9	0,94	2,25	1
	3,90	2,07	2,18	2,81	0,22	0,84	0,24
Genu valgum	84	89	88	4,5	0,52	1,17	0,36
	80	83	84	0,1	0,01	0	0
	94	96	94	12,7	1,66	4,5	2,3
	2,04	2,57	2,32	2,43	0,3	0,94	1,01

Tab. 6 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mLDFW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/SD)

mMPTW	PräOP	ME	FU	Korrektur	Korrektur/ Monat	Rebound	Rebound/ Monat
Gesamt- Kohorte	89	87	88	4,1	0,5	1,7	0,4
	76	81	81	0	0	0	0
	96	94	95	10	1,8	5,6	1,8
	3,29	2,74	2,68	2,40	0,35	1,30	1,34
Genu varum	84	87	86	4	0,3	1,8	0,3
	76	81	81	0,4	0	0	0
	87	92	90	10	0,7	5,6	0,8
	2,78	3,52	2,43	2,93	0,22	1,47	0,28
Genu valgum	91	88	89	4,1	0,6	1,7	0,5
	83	81	82	0,2	0	0	0
	96	94	95	9,2	1,8	4,6	1,8
	2,17	2,85	2,82	2,55	0,44	1,26	0,42

Tab. 7 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mMPTW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/SD)

mTFW	PräOP	ME	FU	Korrektur	Korrektur/ Monat	Rebound	Rebound/ Monat
Gesamt- Kohorte	2,8	-0,7	0,24	4,9	0,55	1,9	0,56
	-14	-7,9	4,8	0,1	0,01	0	0
	12	5,1	-8,9	18,5	4	6,4	3,7
	4,07	2,27	2,18	2,96	0,49	1,34	0,52
Genu varum	-5,92	-1,36	-1,82	4,3	0,39	1,55	0,4
	-14	-7,2	-7,2	0,5	0,5	0	0
	-1	3	2	13,4	1,3	5	1
	3,42	2,89	2,13	4,11	0,33	1,47	0,3
Genu valgum	4,6	-0,66	0,6	4,9	0,58	1,97	0,6
	0,6	-7,9	-,9	0,1	0,1	0	0
	11,9	5,1	4,8	18,5	3,9	6,4	3,7
	1,92	2,09	1,93	2,86	0,50	1,31	0,53

Tab. 8 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mTFW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/SD)

MAD	PräOP	ME	FU	Korrektur	Korrektur/ Monat	Rebound	Rebound/ Monat
Gesamt- Kohorte	-11,6	3,2	-1,2	18,7	2,1	6,5	1,7
	-43,1	-21,5	-18	0,3	0,06	0	0
	42,6	26,2	31,2	63,7	14,1	22	6,84
	15,12	7,83	8,07	10,33	1,79	5,29	1,55
Genu varum	18	4,5	6,9	15,6	1,35	4,2	0,74
	0	-11	-3,7	2	0,13	0	0
	42,6	26,2	26,2	41,6	2,74	14	2
	8,97	10,74	7,64	11,74	0,89	4,59	0,64
Genu valgum	-17,4	2,9	-2,8	19,3	2,28	7	1,97
	-43,1	-21,5	-18	0,3	0,06	0	0
	-2	25	31,2	63,7	14,15	22	6,84
	8,05	7,16	6,90	10,11	1,88	5,37	1,61

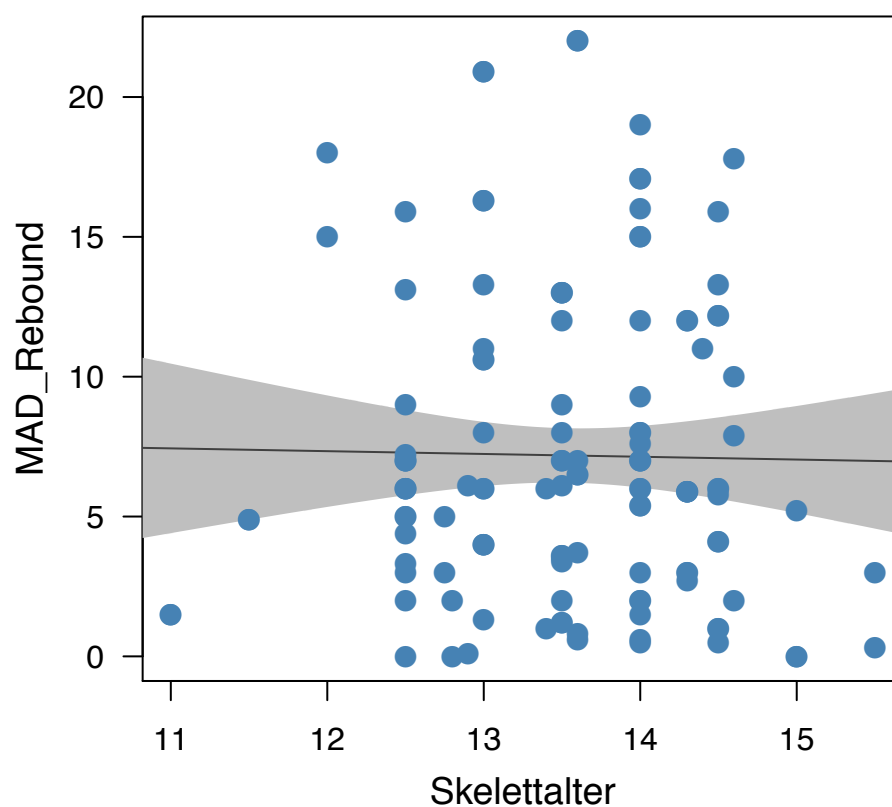
Tab. 9 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen an der MAD in Millimetern (Mittelwert/Minimum/Maximum/SD)

4.3 Rebound der MAD innerhalb der Genu valgum-Kohorte

4.3.1 Vergleich Rebound MAD und biologisches Alter

Die Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum zeigte präoperativ ein biologisches Alter von durchschnittlich 13,5 Jahren und einen Rebound der MAD von im Mittel sieben Millimetern.

Statistisch ließ sich anhand unserer Daten keine Korrelation zwischen dem biologischen Alter (Skelettalter) und dem Ausmaß des Rebound gemessen an der MAD für diese Gruppe nachweisen ($p = 0,385$).

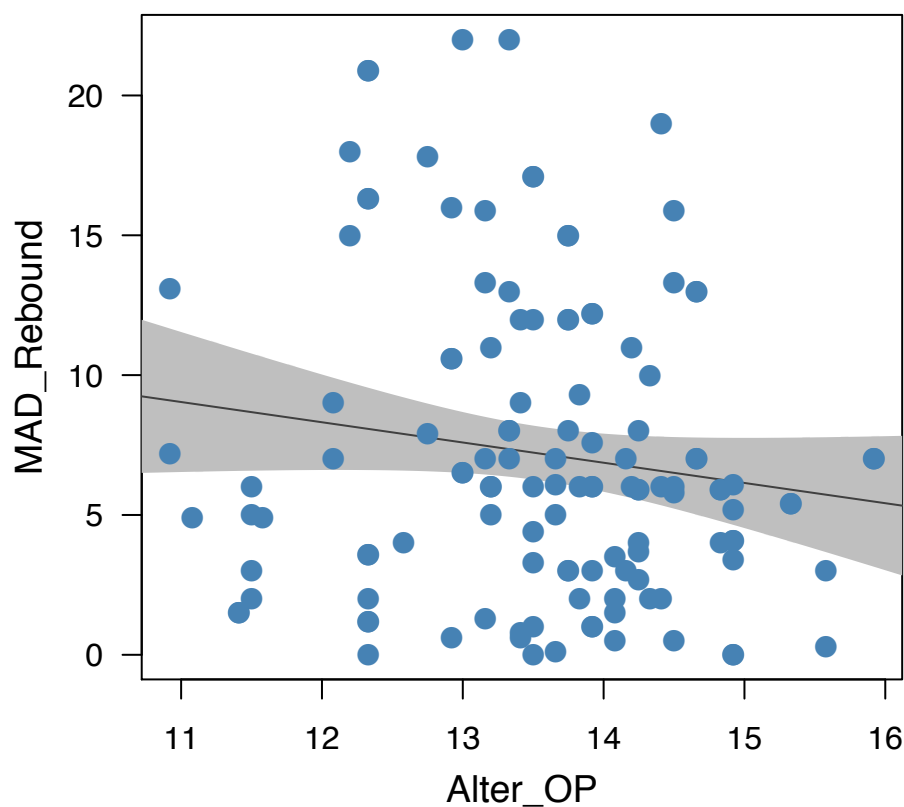


Diagr. 16 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem biologischen Alter bei OP (Jahren)

4.3.2 Vergleich Rebound MAD und chronologisches Alter

Das chronologische Alter der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum lag zum Zeitpunkt der Operation im Mittel bei 13,6 Jahren.

Statistisch konnte anhand unserer Daten für diese Gruppe eine signifikante Korrelation zwischen dem chronologischen Alter und einem Rebound, gemessen an der MAD (mm), nachgewiesen werden ($p = 0,015$). Je jünger die Patienten zum Zeitpunkt der Operation waren, desto wahrscheinlicher ist ein späterer größerer Rebound.

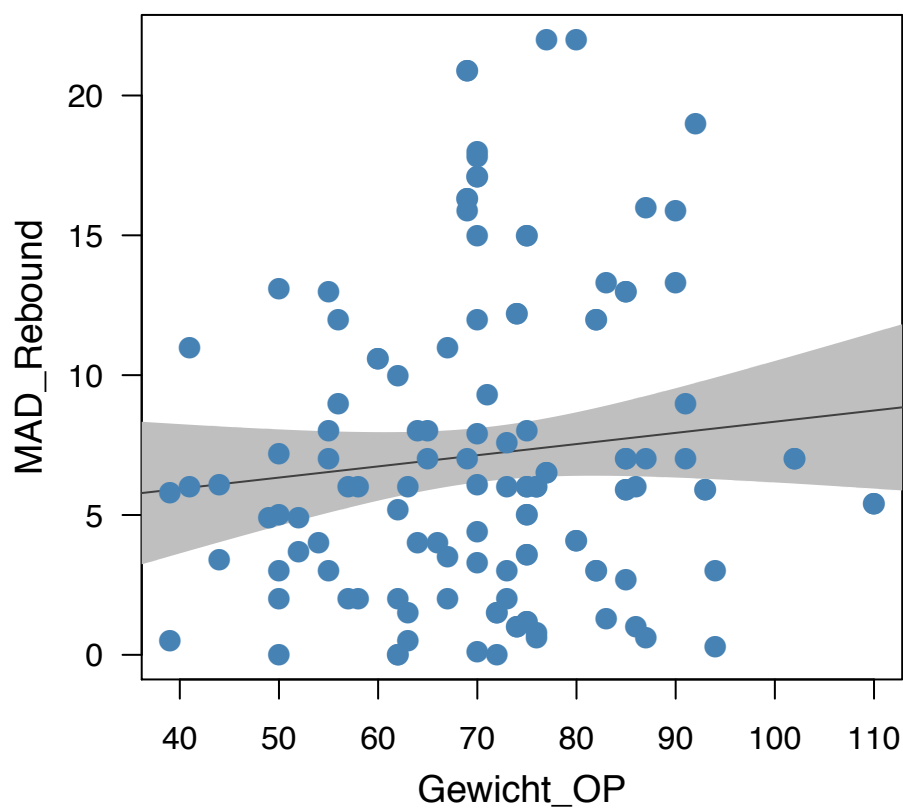


Diagr. 17 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem chronologischen Alter bei OP (Jahren)

4.3.3 Vergleich Rebound MAD und Körpergewicht

Das durchschnittliche Körpergewicht betrug für die untersuchte Gruppe der Patienten mit Genu valgum zum Zeitpunkt der Operation 69,9 Kilogramm.

Es konnte statistisch keine Korrelation zwischen dem Körpergewicht bei Operation und dem Rebound einer MAD nachgewiesen werden ($p = 0,129$).

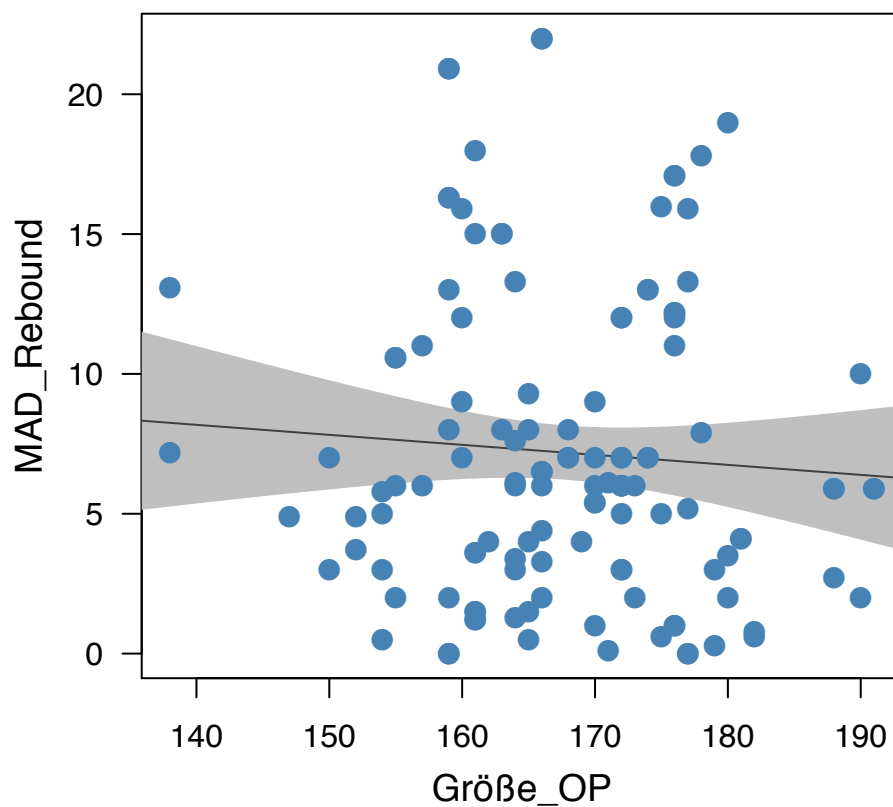


Diagr. 18 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Körpergewicht bei OP (Kg)

4.3.4 Vergleich Rebound MAD und Körpergröße

Die Körpergröße der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum lag im Mittel präoperativ bei 167 Zentimetern.

Es konnte keine statistische Signifikanz in Bezug auf eine Korrelation zwischen der präoperativen Körpergröße und einem Rebound der MAD nachgewiesen werden ($p = 0,452$).

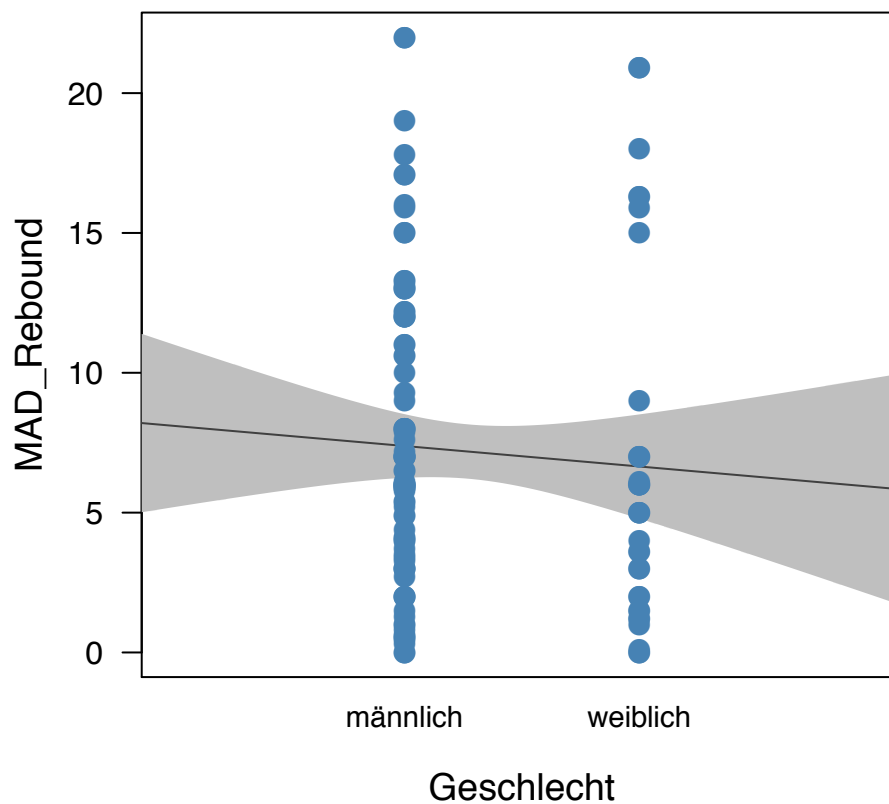


Diagr. 19 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Körpergröße bei OP (cm)

4.3.5 Vergleich Rebound MAD und Geschlecht

In der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum befanden sich insgesamt 50 Patienten. Es wurden 36 männliche und 14 weibliche Patienten mit einer Epiphysiodese versorgt.

Statistisch konnte keine Korrelation zwischen dem Geschlecht der Patienten und einem Rebound der MAD nachgewiesen werden ($p = 0,217$).

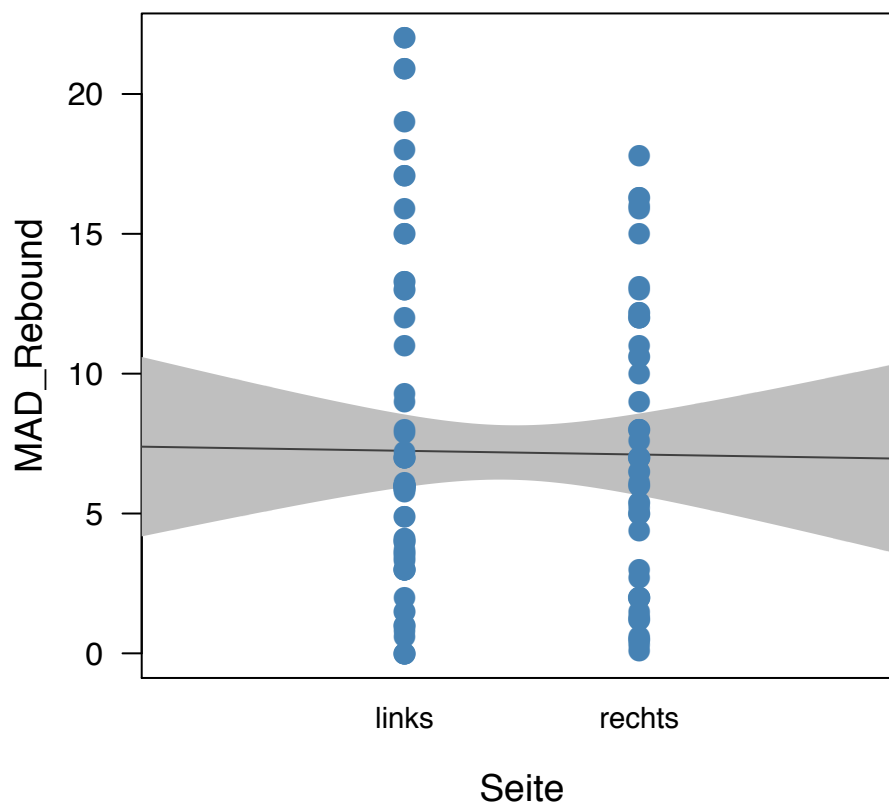


Diagr. 20 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Geschlecht

4.3.6 Vergleich Rebound MAD und operierte Seite

Insgesamt wurden in der Gruppe der Patienten mit einem Genu valgum 124 Eight-Plates implantiert, wovon 69 Platten auf ein rechtes und 55 Platten auf ein linkes Bein entfielen.

Statistisch konnte zwischen dem Rebound und einer Beinseite keine Korrelation nachgewiesen werden. Weder das linke noch das rechte Bein zeigte statistisch im Hinblick auf einen Rebound der MAD einen signifikanten Zusammenhang ($p = 0,835$).

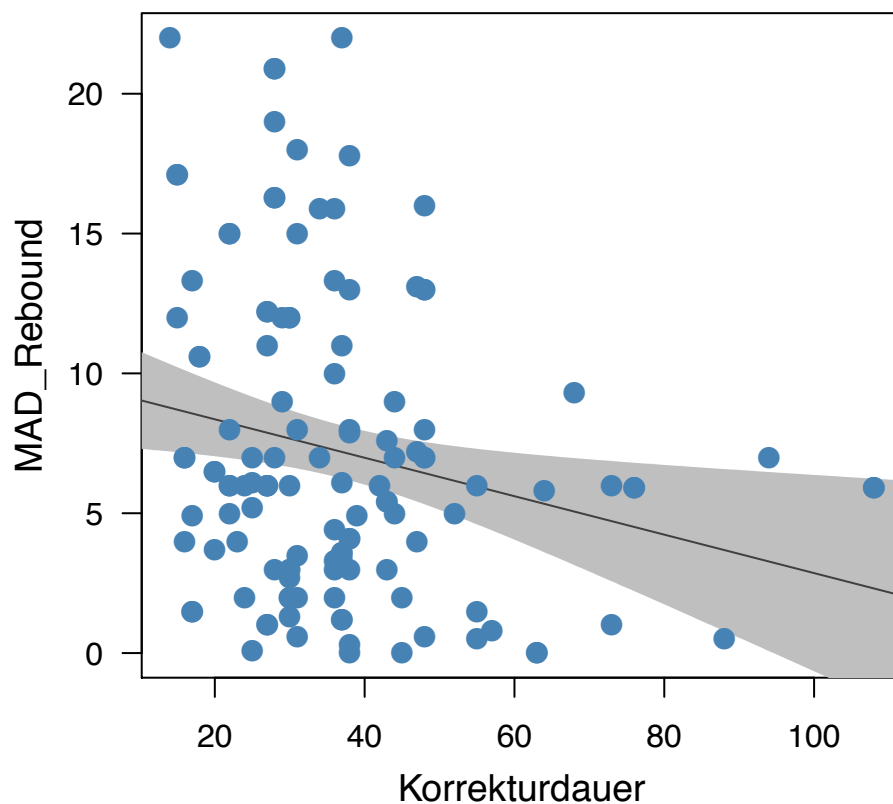


Diagr. 21 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Seitenlokalisation der Epiphysiodese

4.3.7 Vergleich Rebound MAD und Korrekturdauer

Die Korrekturzeit betrug in der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu valgum durchschnittlich 37,7 Wochen. Es konnte eine signifikante Korrelation zwischen der Dauer der Korrektur und einem Rebound der MAD nach Explantation der Eight-Plates nachgewiesen werden.

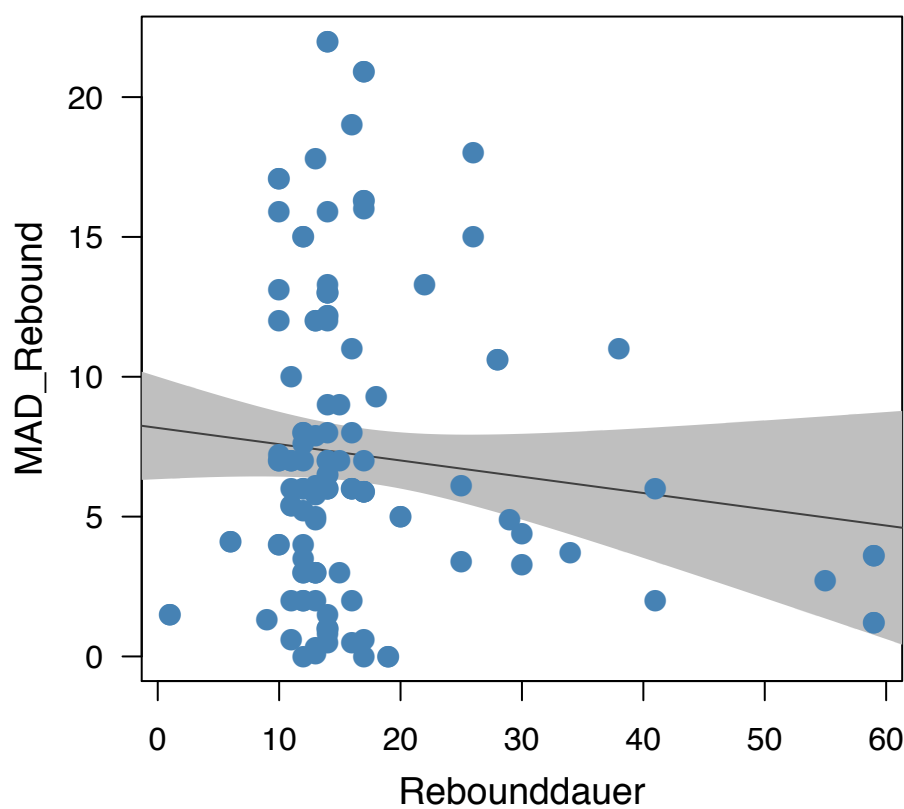
Statistisch ergab sich ein P-Wert von 0,003. Je kürzer die Korrekturdauer, desto wahrscheinlicher ist ein späterer größerer Rebound.



Diagr. 22 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Korrekturdauer (Wochen)

4.3.8 Vergleich Rebound MAD und Nachuntersuchungsdauer

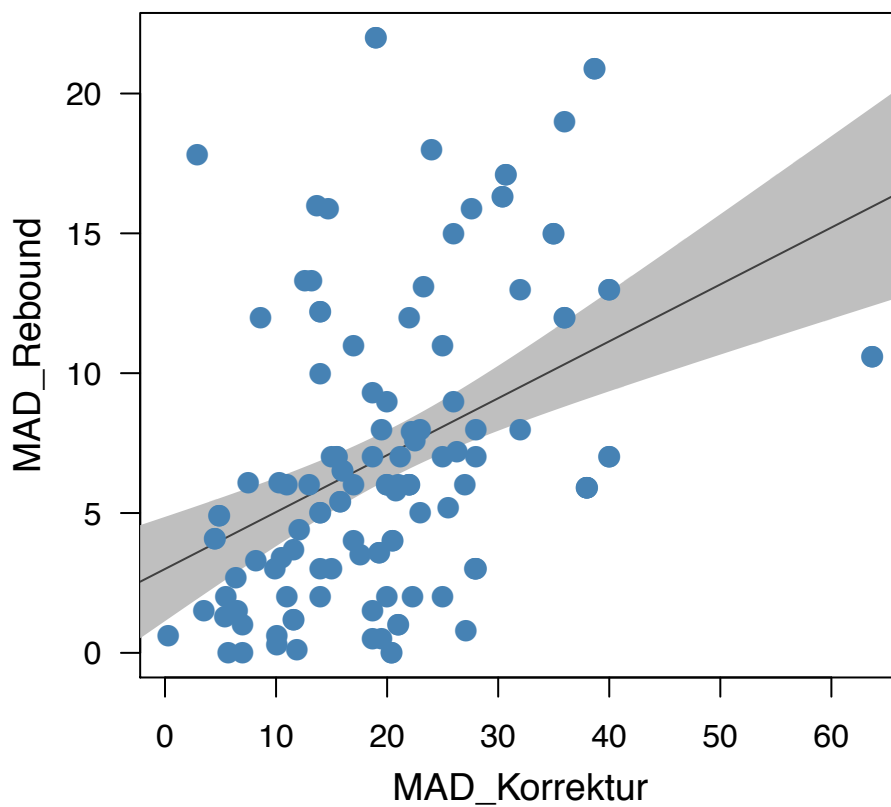
Die Patienten mit einem pathologischen Genu valgum wurden nach Explantation der Eight-Plates im Mittel nach 16,8 Wochen nachuntersucht. Dieses Zeitintervall, in dieser Arbeit als Nachuntersuchungsdauer bezeichnet, hatte statistisch keinen Einfluss auf einen möglichen Rebound der MAD ($p = 0,424$).



Diagr. 23 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Nachuntersuchungsdauer (Wochen)

4.3.9 Vergleich Rebound MAD und absolute Korrektur (mm)

Im Vergleich der absoluten Korrektur in Millimetern mit dem Rebound in Millimetern ergab sich eine statistische Signifikanz. Die durchschnittliche Korrektur lag in dieser Gruppe bei 19,3 Millimetern. Es ergab sich ein P-Wert von 0,000. Je größer die Korrektur der MAD ausfiel, desto größer war der Rebound, der später beobachtet werden konnte.



Diagr. 24 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der MAD-Korrektur (mm)

Multilevel Regression

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.102	0.523	40.954	13.590	0
Skelettalter	0.703	0.804	60.372	0.874	0.385
Alter OP	-1.769	0.707	56.681	-2.503	0.015
Geschlecht	-0.833	0.667	56.232	-1.248	0.217
Größe OP	-0.604	0.796	46.455	-0.758	0.452
Gewicht OP	1.022	0.660	42.956	1.547	0.129
Seite	-0.078	0.375	89.326	-0.209	0.835
Korrekturdauer	-1.390	0.460	107.400	-3.021	0.003
Follow-up	-0.409	0.509	64.066	-0.805	0.424
MAD Korrektur	2.311	0.474	94.630	4.880	0.00000

Tab. 10 Statistische Auswertung Gruppe Genu valgum

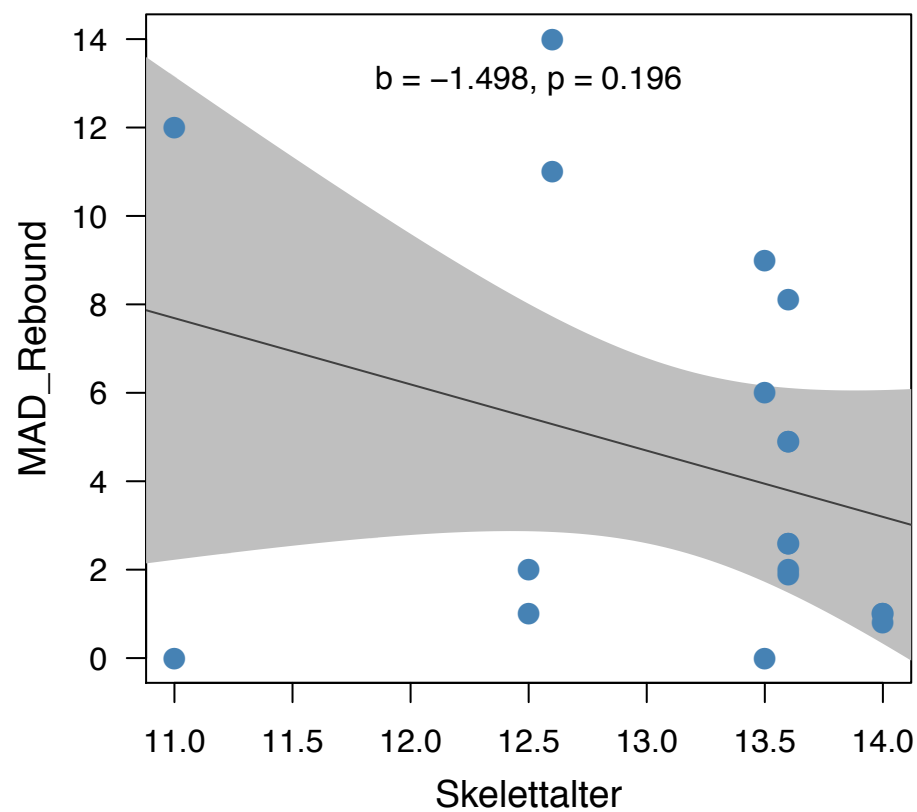
Die oben angezeigte Tabelle fasst die beschriebenen bivariablen Korrelationen zwischen der MAD und den einzelnen Testvariablen zusammen. Eine Signifikanz zeigte sich in Bezug zum Alter der Patienten bei OP, zur Korrekturdauer und der absoluten Korrektur in Millimetern ($p < 0,05$). Das bedeutet je jünger der Patient, je kürzer die Korrekturdauer und je größer die absolute Korrektur der MAD, desto grösser ausgeprägt war das Rebound.

4.4 Rebound der MAD innerhalb der Genu varum-Kohorte

4.4.1 Vergleich Rebound MAD und biologisches Alter

Das biologische Alter in dieser Gruppe lag zum Zeitpunkt der Operation im Mittel bei 13 Jahren.

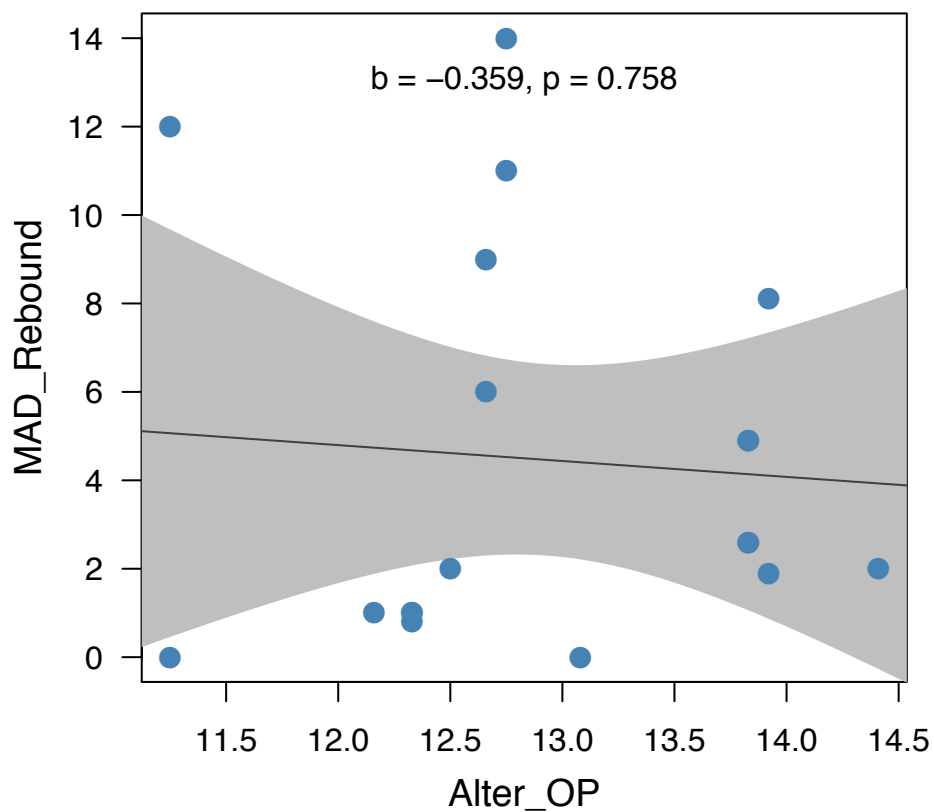
Statistisch ergab sich keine Korrelation zwischen dem biologischen Alter bei OP und einem möglichen Rebound der MAD ($p = 0,196$).



Diagr. 25 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem biologischen Alter (Jahren)

4.4.2 Vergleich MAD und chronologisches Alter

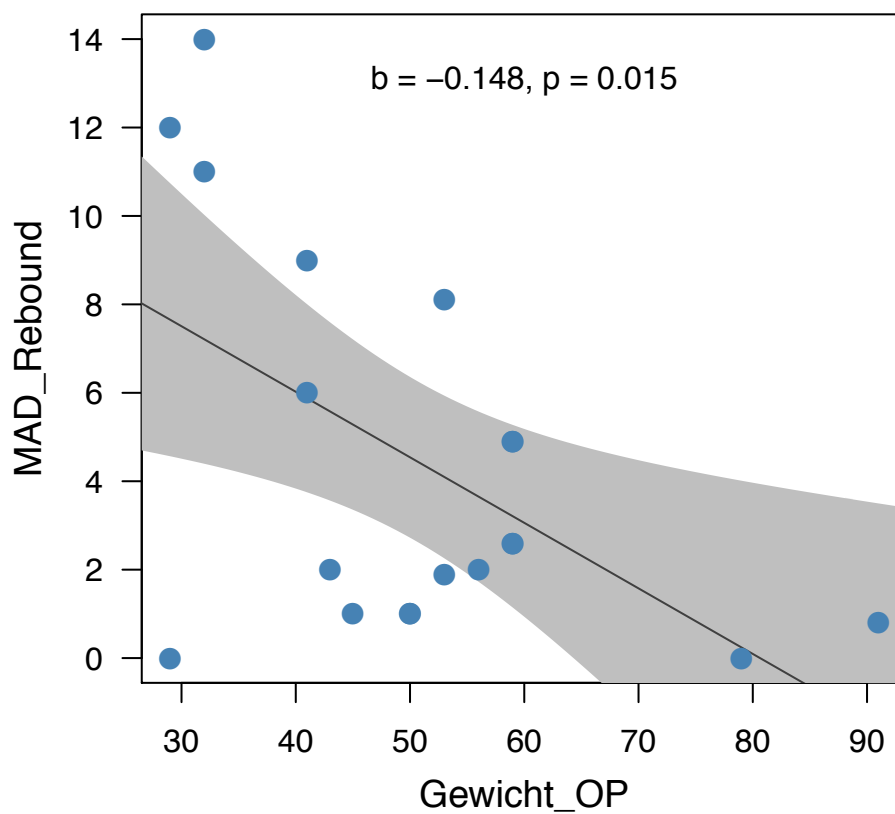
Das durchschnittliche chronologische Alter zum Zeitpunkt der Operation lag in der Gruppe der Patienten mit einem Genu varum bei 12,8 Jahren. Statistisch ergab sich aus unseren Daten keine Signifikanz in Bezug auf einen Rebound ($p = 0,758$).



Diagr. 26 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem chronologischen Alter (Jahren)

4.4.3 Vergleich MAD und Körpergewicht

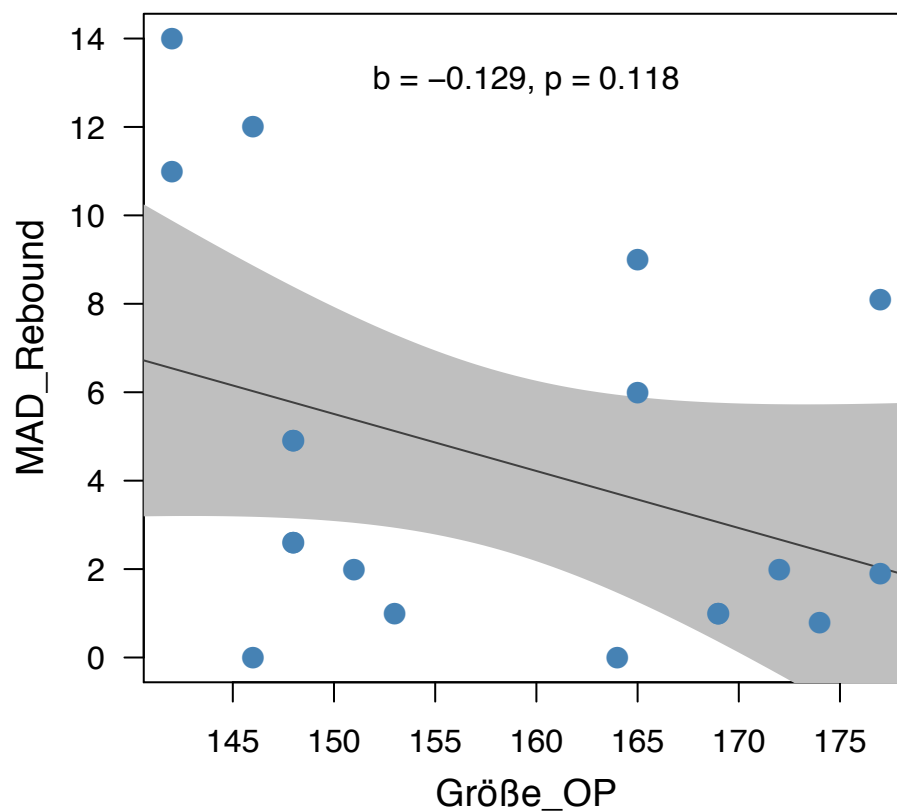
In der Gruppe der Patienten mit einem Genu varum lag das Körpergewicht zur Operation im Mittel bei 55,4 Kilogramm. Statistisch konnte eine Korrelation des Körpergewichtes zum Zeitpunkt der Operation und einem Rebound der MAD nachgewiesen werden ($p = 0,015$). Je leichter die Patienten zum Zeitpunkt der Operation waren, desto wahrscheinlicher war ein größerer Rebound.



Diagr. 27 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Körpergewicht bei OP (Kg)

4.4.4 Vergleich MAD und Körpergröße

Die Körpergröße dieser Kohorte lag zum Zeitpunkt der Operation im Mittel bei 160 Zentimetern. Es ergab sich statistisch kein signifikanter Zusammenhang mit einem möglichen Rebound der MAD ($p = 0,118$).

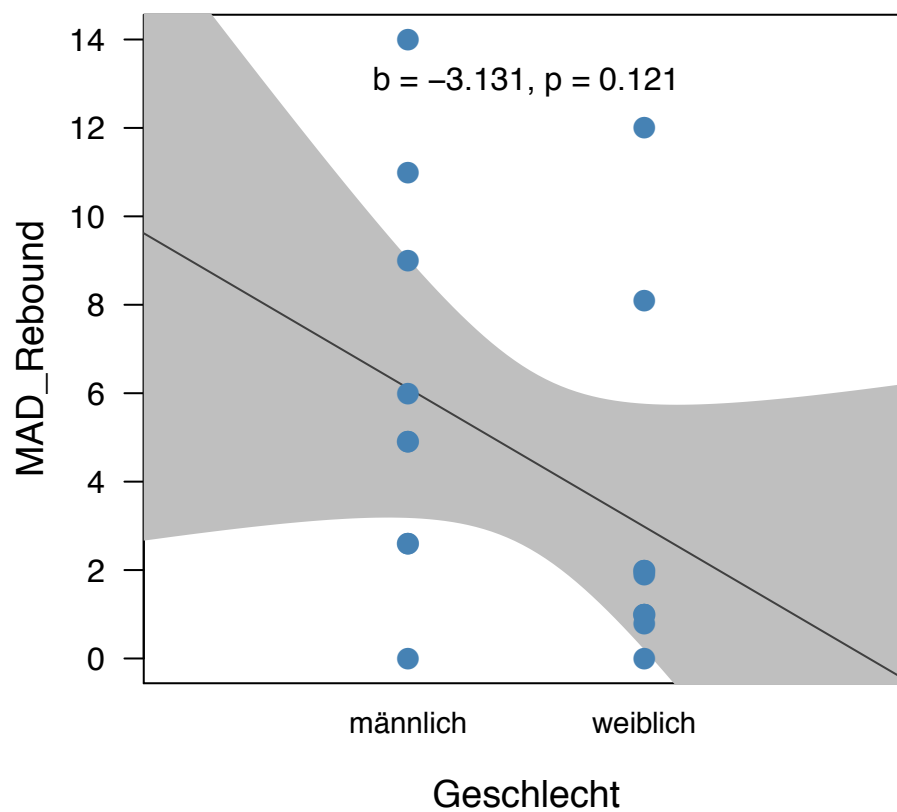


Diagr. 28 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Körpergröße bei OP (cm)

4.4.5 Vergleich MAD und Geschlecht

In der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu varum befanden sich insgesamt zehn Kinder. Es wurden vier Jungen und sechs Mädchen mit einer Epiphysiodese versorgt.

Statistisch konnte keine Korrelation zwischen dem Geschlecht der Patienten und einem Rebound der MAD nachgewiesen werden ($p = 0,121$).

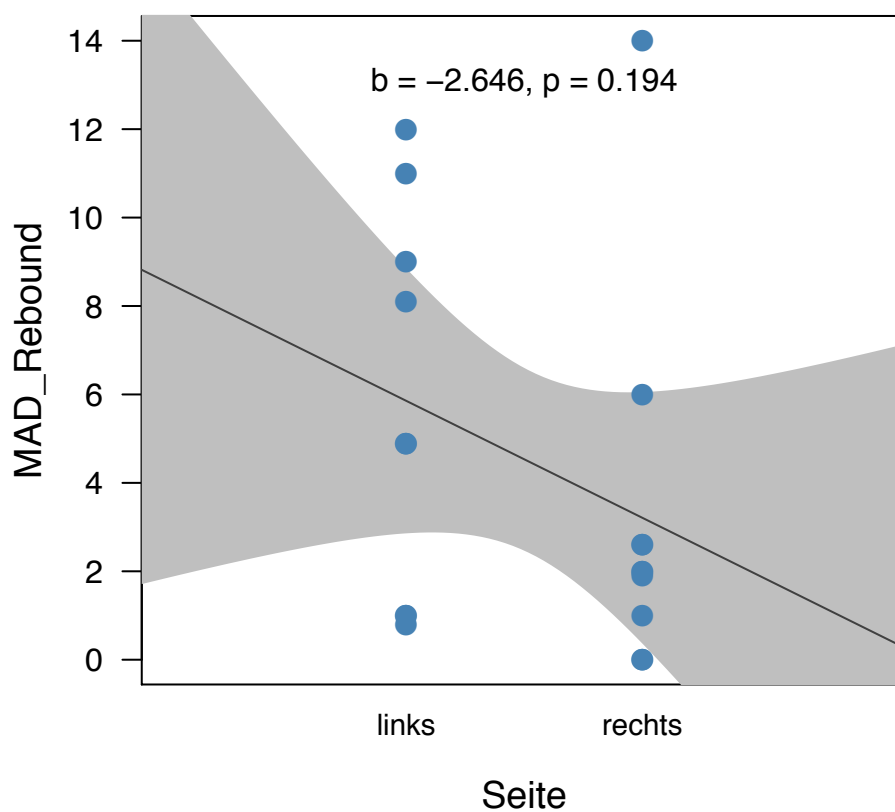


Diagr. 29 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Geschlecht

4.4.6 Vergleich MAD und operierte Seite

Insgesamt wurden in der Gruppe der Patienten mit einem Genu varum 21 Eight-Plates implantiert, wovon 11 Platten auf ein rechtes und zehn Platten auf ein linkes Bein entfielen.

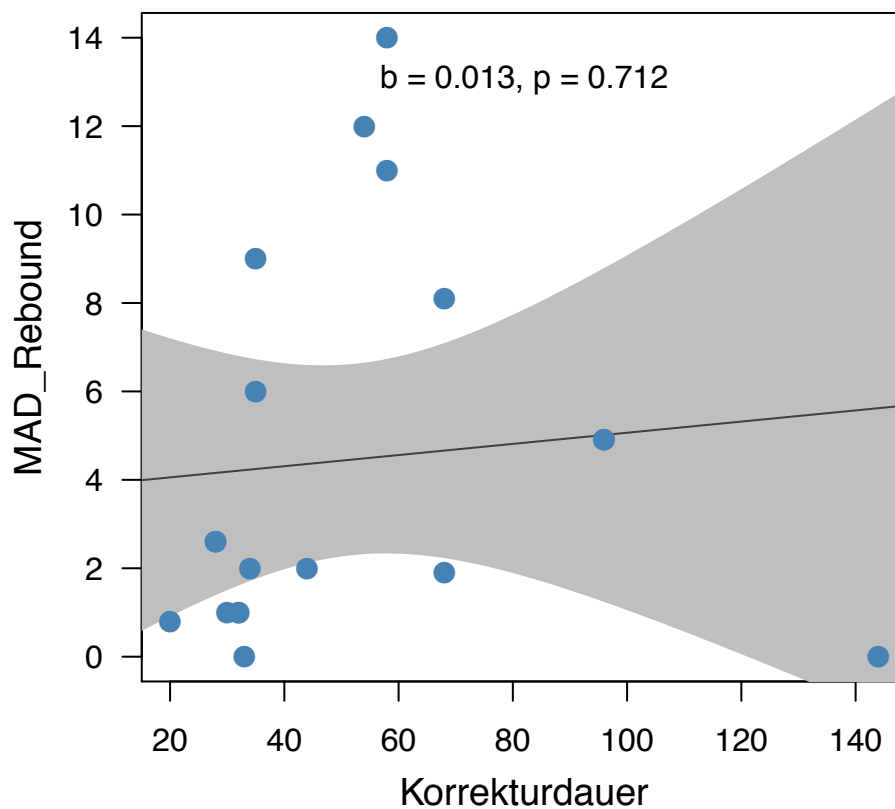
Statistisch konnte zwischen dem Rebound und einer operierten Beinseite keine Korrelation nachgewiesen werden. Weder das linke noch das rechte Bein zeigte statistisch im Hinblick auf einen Rebound der MAD einen signifikanten Zusammenhang ($p = 0,194$).



Diagr. 30 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der operierte Seite

4.4.7 Vergleich MAD und Korrekturdauer

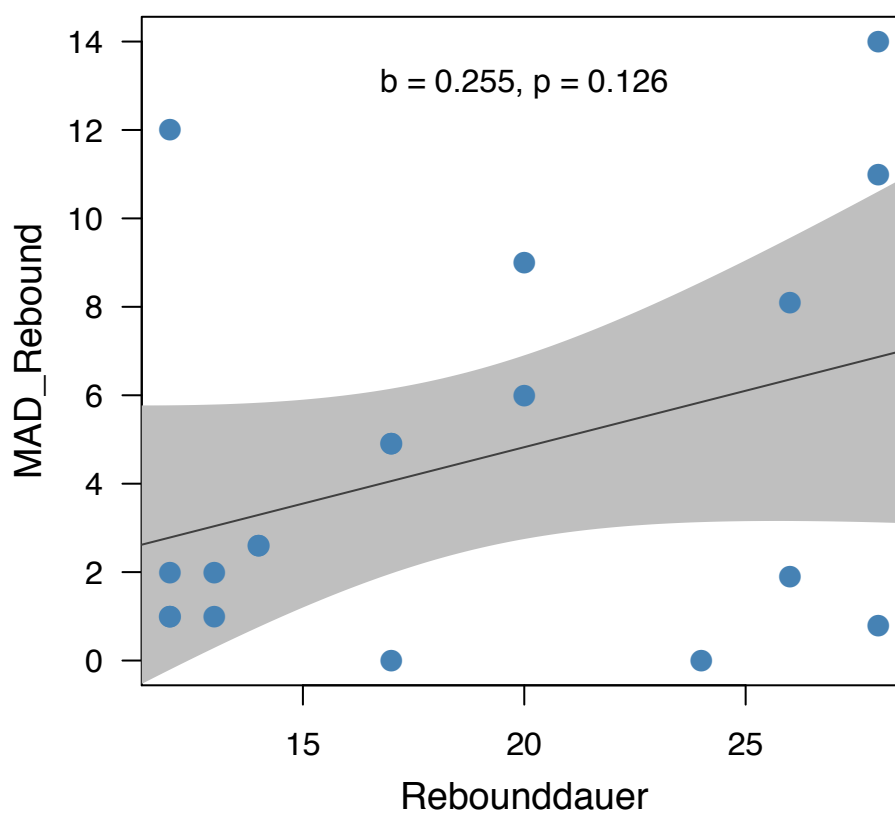
Die Patienten mit einem pathologischen Genu varum wurden im Mittel 52 Wochen mit einer Epiphysiodese versorgt bzw. behandelt. Die Dauer der Korrektur hatte statistisch keinen signifikanten Einfluss auf einen möglichen Rebound der MAD ($p = 0,712$).



Diagr. 31 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Korrekturdauer (Wochen)

4.4.8 Vergleich MAD und Nachuntersuchungsdauer

In der Gruppe der Patienten mit einem pathologischen Genu varum betrug die durchschnittliche Zeit bis zur Nachuntersuchung 18,6 Wochen. Es konnte keine signifikante Korrelation zwischen der Länge des Intervalls nach Entfernung der Epiphysiodese und der ersten Nachkontrolle und einem möglichen Rebound der MAD nachgewiesen werden ($p = 0,126$).

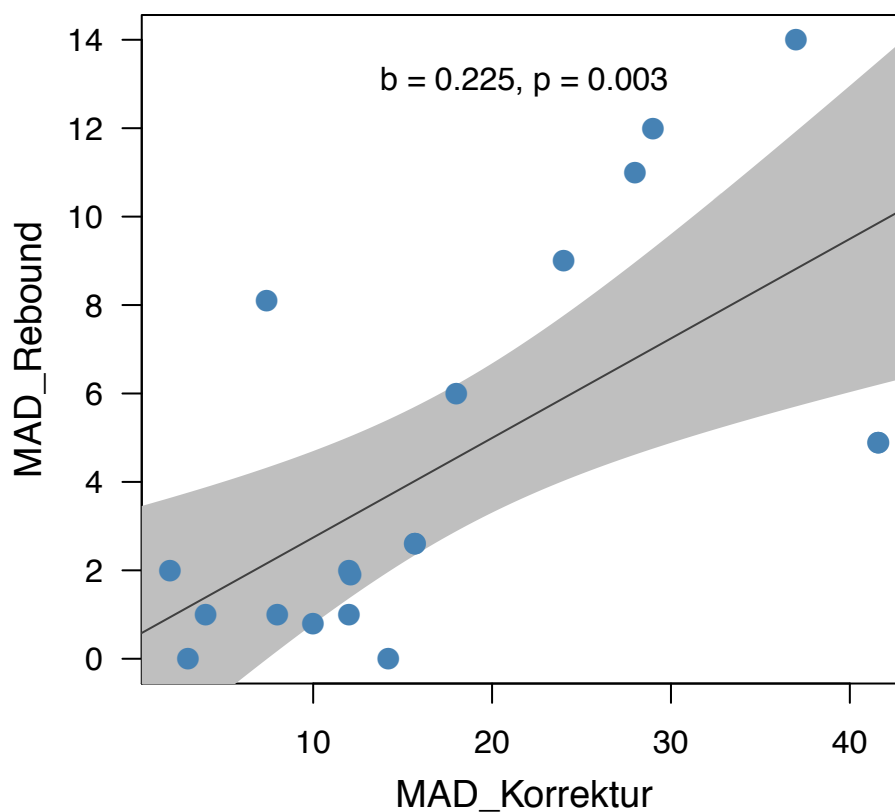


Diagr. 32 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Nachuntersuchungsdauer (Wochen)

4.4.9 Vergleich MAD und absolute Korrektur

Die durchschnittliche Korrektur lag in der Gruppe mit einem pathologischen Genu varum bei 15,6 Millimetern.

Statistisch konnte in dieser Gruppe eine signifikante Korrelation zwischen der absoluten Korrektur, gemessen an der MAD, und einem möglichen Rebound der MAD nachgewiesen werden. Es ergab sich ein P-Wert von 0,003. Je größer die absolute Korrektur, desto wahrscheinlicher zeigte sich ein späterer größerer Rebound.



Diagr. 33 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der MAD-Korrektur (mm)

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode

Im Rahmen dieser Arbeit sollte sowohl das Verfahren der Epiphysiodese durch die Eight-Plate an sich, als auch dessen Komplikationen, speziell das Reboundphänomen untersucht werden. Im Hinblick auf das Reboundphänomen wurde versucht, mögliche Ursachen und Einflussfaktoren für dessen Auftreten zu detektieren und zu beschreiben. Zu diesem Zweck wurden Krankenakten und Befunde jugendlicher Patienten der Kinderorthopädischen Sektion der Klinik Volmarstein retrospektiv ausgewertet. Unter der Vorstellung der besseren Vergleichbarkeit späterer Ergebnisse wurden ausschließlich Patienten eingeschlossen, deren frontales Malalignment idiopathischer Genese war und die mittels temporärer Epiphysiodese durch die Eight-Plate behandelt wurden. Patienten mit angeborenen Achsfehlstellungen beispielsweise im Rahmen von dysplastischen Syndromen oder Frakturen wurden für diese Studie nicht berücksichtigt.

Voraussetzung zum Einschluss eines Patienten in die Studie war ein vollständiger Datensatz. Dieser definierte sich durch mindestens drei radiologische Ganzbeinstandaufnahmen mit dazugehörigen Anamnesen und klinischen Befunden zum Zeitpunkt vor Implantation und Explantation der Platten, sowie mindestens einer Nachuntersuchung. Die klinischen Befunde berücksichtigten das Geschlecht, die Körpergröße, das Körpergewicht, sowie schlussfolgernd den Body-Mass-Index. Darüber hinaus musste eine radiologische anterior-posteriore Untersuchung der linken Hand vor Beginn der Wachstumslenkung vorliegen.

Anhand der radiologischen Untersuchung der linken Hand wurde das biologische Alter vor Implantation der Eight-Plate nach Greulich/Pyle bestimmt (Pyle und Greulich 1959). Im Kombination mit der Weite der tibialen und femoralen Epiphysenfuge und der Korrekturpotentiale der Eight-Plate wurde indirekt ein Rückschluss auf die mögliche Korrekturdauer gezogen und der Implantationszeitpunkt hierdurch festgelegt (Burghardt und Herzenberg 2010; Bayhan et al. 2017).

Die Explantation der Platten erfolgte nach Erreichen der vorher angestrebten Beinachse und den Definitionen einer physiologischen Beinachse nach Paley et al. bzw. Galla et al. (Paley und Herzenberg 2005; Galla und Lobenhoffer 2007).

Die radiologischen und klinischen Nachuntersuchungen nach Metallentfernung bildeten die Grundlage zur Berechnung des Rebounds in unserer Studie. Die Zeitspanne zwischen der Metallentfernung und der ersten Nachuntersuchung/ Follow Up wurde als Nachuntersuchungszeit definiert. An der Klinik Volmarstein wurde vor Beginn dieser Arbeit versucht, die ersten radiologischen Nachuntersuchungen innerhalb von drei Monaten zu realisieren. Die Nachuntersuchungszeit dieser Arbeit von im Schnitt 17 Wochen ist damit im Vergleich zur aktuellen Literatur eher kurz und zeigte zudem große zeitliche Schwankungen zwischen einer und 59 Wochen (Leveille, Razi und Johnston 2017; Farr et al. 2018; Bayhan et al. 2017). Die Variabilität des Nachuntersuchungszeitpunktes und die im Schnitt kurze Phase bis zur ersten radiologischen Kontrolle nach Metallentfernung waren in unserer Arbeit aufgrund des retrospektiven Studiendesigns nachträglich nicht beeinflussbar. Wie Park et al. schon beschrieben zeigte sich auch in dieser Arbeit, dass zum Ende der Therapie insbesondere bei klinisch guten Ergebnissen zum Zeitpunkt der Metallentfernung eine abnehmende Compliance der betroffenen Patienten vorliegt mit teils mangelnden Nachuntersuchungsdaten bzw. stark schwankenden Latenzzeiten. Aufgrund der kurzen Nachuntersuchungszeit ist eine Beurteilung bezüglich des Ausmaßes eines zu erwartenden Rebounds anhand der hier vorliegenden Daten nur für eine Dauer von drei Monaten möglich. Eine spätere Veränderung bis zum Wachstumsabschluss wäre ebenso denkbar. Diese stünde dann aber gegebenenfalls nicht mehr in Verbindung mit dem Effekt durch eine Metallentfernung, sondern könnte auch auf weitere Wachstumsprozesse zurückzuführen sein. Hervorzuheben ist jedoch, dass trotz des kurzen Nachuntersuchungsintervalls circa 96,5% aller Patienten bereits einen Rebound zeigten. Dies lässt den Schluss zu, dass ein Rebound scheinbar bereits kurz nach Entfernung der Epiphysiodese auftreten kann. Zukünftige Studien, insbesondere prospektive Studien, können und sollten hier auf eine strenge Einhaltung der Untersuchungszeiträume achten, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Patienten und deren Angehörige müssen darüber aufgeklärt werden, dass erst nach

vollständiger Ossifikation der Wachstumsfugen die Therapie beendet und ein Ergebnis erst dann hinreichend beurteilt werden kann.

Grundlage der Achsenkorrekturen bildeten in unserer Studie radiologische Ganzbeinstandaufnahmen, an denen die Vermessungen der Beinachsen vorgenommen, sowie die Achsenwinkel und die MAD bestimmt wurden. Diese Aufnahmen entstanden in einer standardisierten horizontalen Einstelltechnik mit anterior-posteriorem Strahlengang. Eine Markierung am Boden sollte die Position des Patienten vergleichbar machen bei einem für Ganzbeinstandaufnahmen üblichen Detektor/Film-Abstand von 2,5 bis 3 m (Gladbach und Heijens 2008).

Zusätzlich wurde auf einen geraden Stand der Patienten geachtet mit gleicher Belastung beider Füße. Voraussetzung war eine vollständige Aufnahme von Hüftgelenk, Kniegelenk und oberem Sprunggelenk (Becht et al. 2008). Die Qualität der Ganzbeinaufnahme setzte neben den üblichen radiologischen Qualitätsmerkmalen eine parallele und zentrale Ausrichtung der Patellae bzw. der Femurkondylen zum Röntgenmedium voraus (Waldt, Eiber und Wörtler 2011). Dies stellt den derzeitigen Goldstandard der Ganzbeinstandaufnahme als Grundlage zur Berechnung einer Achsfehlstellung in der Frontalebene dar (Paley und Herzenberg 2005; Strecker und Keppler 2014).

Nichtsdestotrotz werden gerade im Hinblick auf standardisierte radiologische Aufnahmen viele Diskussionen geführt. Dies betrifft sowohl die Untersuchung und Vermessung als auch die Wahl des Verfahrens an sich. So postulieren manche Autoren, dass eine digitale Röntgenaufnahme der nativen Röntgenaufnahme überlegen sei, da die Bildqualität durch eine höhere Auflösung verbessert und so eine leichtere Vermessung sowie Nachbearbeitung bei niedrigerer Strahlenbelastung für den Patienten möglich sei (Heyne et al. 1999).

Im Rahmen der Vermessung von Ganzbeinaufnahmen bestehen zudem auch in Bezug auf die Definition der Gelenkmittelpunkte und Achsen große Abweichungen. So definierte beispielsweise Paley das Kniegelenkszentrum als Mittelpunkt zweier Tangenten entlang der Femurkondylen bzw. des Tibiaplateaus. Zur Definition des Kniegelenkzentrums finden sich nach Moreland et al. allein fünf verschiedene Angaben, welche von proximal nach distal verlaufen und unabhängig von den Begleitstrukturen des Femurs oder der Tibia bleiben (Moreland, Bassett und Hunker

1987). Die unterschiedlichen Definitionen der Beinachsen und Gelenkzentren können selbstredend zu einer differierenden Vermessung und damit auch zu unterschiedlichen Ergebnissen der Achsenkorrektur führen.

Als Grundlage unserer Arbeit diene die digitale radiologische Ganzbeinaufnahme – durchgeführt von speziell geschultem Personal anhand standardisierter Messmethoden. Auf eine Positionierung des Patienten in der Röntgenvorrichtung durch den Operateur selbst, wie von Strecker et al. postuliert, wurde aus logistischen und zeitlichen Gründen verzichtet (Strecker und Keppler 2014). Zur Vermessung der einzelnen Aufnahmen dienten bei jedem Patienten die Definitionen der Achsen und Gelenkwinkel von Paley et al. (Paley et al. 1994).

Wir gehen davon aus, dass durch die exakte Durchführung der Röntgenaufnahmen nach den heutigen Standards und die Verwendung der immer gleichen Definition der Winkel und Achsen in der Vermessung der Ganzbeinstandaufnahmen der methodische Fehler minimiert werden konnte. Nichtsdestotrotz bleibt aufgrund der Variabilität der Röntgenbilder ein gewisser Fehlerquotient, der sich nicht berechnen lässt, jedoch jeder Röntgenuntersuchung zugrunde liegt und damit auch Einfluss auf die hier vorliegenden Ergebnisse nimmt. Diese sogenannte Inter- bzw. Intraobservervariabilität ließe sich mit hohem zeitlichen und personellen Aufwand minimieren. Dies wurde aber aufgrund des logistischen Aufwandes nicht verfolgt und stellt in der späteren Auswertung einen nicht zu berechnenden Fehlerquotienten dar.

Zur Beurteilung einer Achsabweichung der unteren Extremität wurden die oben beschriebenen Gelenkwinkel, sowie die mechanische Achsendeviation verwendet. Hieraus wurden die Therapiemaßnahmen abgeleitet. Zur Interpretation eines Rebounds nach Metallentfernung wählten wir in dieser Arbeit später dann lediglich die mechanische Achsendeviation in Millimetern. Andere Arbeiten, die sich mit der jugendlichen Wachstumslenkung bzw. dem Reboundphänomen beschäftigten, hatten meist die Gelenkwinkel am Knie als Maß des Rebounds verwendet (Zuege, Kempken und Blount 1979; Park et al. 2005; Leveille, Razi und Johnston 2017). Wir glauben aber, dass die MAD der leichter zu interpretierende Parameter ist und insbesondere bei Patienten mit multiplen Platten tibial und femoral weniger anfällig ist, als dies beispielsweise die Gelenkwinkel (mLDFW/mMPTW) wären.

Zudem ist die mechanische Achsendeviation unabhängiger von der Lokalisation der Achsabweichung bzw. Pathologien angrenzender Gelenke (Paley und Herzenberg 2005).

Im Anschluss an die Datenerhebung der klinischen und radiologischen Parameter wurde eine multivariable Regressionsanalyse durchgeführt. Gerade statistische Berechnungen zur Endpunktanalyse über das Outcome zu chirurgischen Therapien unterliegen multiplen, nicht linearen Einflussfaktoren, und können so nicht an linearen, univariablen Rechenmodellen nachvollzogen werden. Die Schwierigkeit einer multivariablen Regressionsanalyse besteht stets darin, inwiefern eine bestimmte zu untersuchende Variable Einfluss auf eine Zielvariable nimmt, wie beispielsweise der Rebound gemessen an der mechanischen Achsendeviation in Millimetern in dieser Arbeit. Auch hier ist, wie später ausgeführt, von mehreren sich teilweise bedingenden Variablen auszugehen. So unterliegt beispielsweise das Korrekturpotential einer Epiphysiodese sowohl dem Alter des Patienten bei Implantation, als auch weiteren nicht vorhersehbaren Einflussfaktoren, die im weiteren Verlauf das Wachstumsverhalten beeinflussen. Da Wachstum an sich ein nicht lineares und damit nicht vollständig vorhersehbares Verhalten zeigt, unterliegt eine statistische Erhebung die das Wachstumsverhalten bei Kindern mit einschließt, immer auch unvorhersehbaren Variablen und damit undefinierten Fehlerquotienten.

Zusammenfassend konnten im Rahmen des Studiendesigns insgesamt 60 Jugendliche in die Studie eingeschlossen und deren Daten ausgewertet werden. Hierunter befanden sich 20 weibliche und 40 männliche Patienten im Alter zwischen 11 und 16 Jahren. Alle Patienten waren zwischen 2007 und 2016 in der Orthopädischen Klinik Volmarstein untersucht und operiert worden. Die Behandlungsmethoden und -abläufe hatten sich trotz des langen Beobachtungszeitraums nicht verändert, sodass wir von einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse aller Patienten ausgehen. Der lange Beobachtungszeitraum unserer Studie mit Beginn im Jahr 2007 ist der Tatsache geschuldet, dass vor allem aufgrund mangelnder Nachuntersuchungsdaten nur bei einem Teil der in der Klinik Volmarstein insgesamt mit der Hemiepiphysiodese behandelten Patienten vollständige Datensätze im Sinne der Studie existierten.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Wachstumslenkung von Achsfehlstellungen in der Frontalebene mittels temporärer Epiphysiodese ist ein seit vielen Jahren angewandtes Verfahren. Durch die Einführung der Eight-Plate im Jahr 2005 ist eine neue Methode etabliert worden, deren Erfolg hinsichtlich der Achsenkorrektur jugendlicher Beinachsen in der Literatur mehrfach beschrieben wurde (Burghardt et al. 2008; Burghardt und Herzenberg 2010; Jelinek et al. 2012). Die Orthopädische Klinik in Volmarstein verwendet dieses Verfahren zur Korrektur jugendlicher Achsfehlstellungen der unteren Extremität seit 2006. Es zeigte sich jedoch, dass bei manchen Patienten trotz guter Ergebnisse zum Zeitpunkt der Materialentfernung in den anschließenden radiologischen Kontrollen eine Veränderung der Beinachse meist im Sinne eines Zurückweichens in Richtung der Ausgangsfehlstellung eintrat. Bereits andere Autoren beschrieben diese Tatsache im Zusammenhang mit dem Verfahren der temporären Epiphysiodese allgemein und der Eight-Plate im Speziellen, welches als Reboundphänomen bezeichnet wurde. (Burghardt et al. 2008; Ballal, Bruce und Nayagam 2010; Boero, Michelis und Riganti 2011; Kumar et al. 2016; Park, Kang und Kim 2016; Leveille, Razi und Johnston 2017; Farr et al. 2018). Es existiert jedoch in der Literatur bisher keine Einigkeit bezüglich einer Definition dieses Umstandes – weder in Bezug auf das Auftreten an sich, noch die Größe der Abweichung, noch mögliche Einflussfaktoren.

Das Reboundphänomen scheint aber vor allem in den letzten Jahren an Bedeutung zu gewinnen. Seit 2016 sind mehrere große Arbeiten erschienen, die sich explizit mit der Frage des Rebounds nach operativer Achskorrektur der unteren Extremität und dessen Folgen beschäftigt haben. Im Jahr 2016 erschien die Studie von Park et al. Sie hatten in ihrer Arbeit mit 37 Jugendlichen, die mittels Epiphysiodese durch die Blount Staplers behandelt wurden einen Rebound als Rückentwicklung größer 3° des erreichten tibiofemorale Winkels definiert, was auf 14 der 37 Patienten zu traf. Sie konnten anhand einer Multiregressionsanalyse anschließend zeigen, dass ein hohes Korrekturpotential der Staples und ein junges Alter bei Implantation mit einem späteren Rebound korrelieren können. Ein hoher BMI hingegen zeigte sich in ihrer Studie als protektiver Faktor hinsichtlich des Behandlungserfolges (Park, Kang und Kim 2016).

In einer späteren Arbeit von Leveille et al. konnte anhand von 45 Jugendlichen ebenfalls eine hohe Reboundquote nach Achsenkorrektur mittels Eight-Plate beobachtet werden. Sie definierten einen Rebound als eine klinisch relevante Rückentwicklung des tibiofemorale Winkels von bereits 5 – 10° nach Metallentfernung. Die Patienten ihrer Studie, die sich einer Revisionsoperation zur Korrektur des stattgefundenen Rebounds unterzogen, zeigten im Mittel einen Rebound von 11,6° des tibiofemorale Winkels (Range: 4 – 23°). Hervorgehoben wurde aber auch, dass sich bereits ab einem Rebound von 5° eine klinisch relevante negative Entwicklung zeigt, die es formal zu korrigieren gilt. Die Einflussfaktoren, die mit dem Auftreten eines Rebounds korrelieren, waren in ihrer Studie ebenfalls ein junges Alter bei Implantation, sowie eine große initiale Achsabweichung (Leveille, Razi und Johnston 2017). Die aktuell letzte bekannte Arbeit zum Thema Rebound nach jugendlicher Achsenkorrektur durch die Eight-Plate wurde von Farr et al. 2018 veröffentlicht. Sie definierten eine Rückweichungsquote >3mm der MAD nach Metallentfernung als Rebound. Diese Definition schloss circa zwei Drittel ihrer 29 Patienten ein. Positiv korrelierend im Sinne eines häufigeren Auftretens eines Rebounds waren in ihrer Arbeit ein hoher BMI, sowie ein junges Alter bei Implantation. Eine Empfehlung zur genaueren Vorhersage eines möglichen Rebounds oder über mögliche therapeutische Konsequenz konnten sie nicht treffen (Farr et al. 2018). Vergleicht man diese drei Arbeiten miteinander, so zeigt sich zum einen, dass eine einheitliche Definition eines Rebounds bisher nicht existiert. Zum anderen scheinen vor allem drei mögliche Einflussfaktoren ein Reboundphänomen zu begünstigen: ein junges Alter bei Implantation, eine große initiale Achsabweichung bzw. eine hohe Korrekturrate, sowie das Körpergewicht bzw. der BMI.

In unserer Arbeit mit 60 Jugendlichen (20 Mädchen und 40 Jungen), wurden ausschließlich Patienten mit einem idiopathischen Malalignment der Frontalebene eingeschlossen, die mittels Implantation der Eight-Plate behandelt worden waren. Wir definierten die mechanische Achsendeviation als Parameter eines Rebounds. Es zeigte sich, dass von 116 behandelten Beinen lediglich vier Beinachsen nach Entfernung der Platten bis zur Nachuntersuchung keine Rückweichung von der erreichten Korrektur aufwiesen. Dies entsprach einer Rückweichungsquote von 96,5 % und führte dazu, dass auch nach Abschluss der Therapie circa 20 % aller behandelten Patienten eine

signifikante Achsabweichung aufwiesen, gemessen an den Grenzen des Malalignment Tests (Galla und Lobenhoffer 2007). In unserer Untersuchung waren dies für die Therapie eines Genu valgum 10 Patienten und für die Therapie eines Genu varum 2 Patienten. Die durchschnittliche Rückentwicklung der Beinachse betrug dabei abhängig von der Entität der initialen Fehlstellung zwischen 4,2 und 7 mm. Vergleichbare Werte finden sich in der oben erwähnten Arbeit von Farr et al., die einen Rebound als Rückentwicklung der MAD >3mm definierten.

Unsere Arbeit wies damit eine vergleichsweise hohe Reboundquote auf, was darauf zurückzuführen ist, dass wir anders als die oben beschriebenen Studien keine Grenzwerte einer Rückweichung definierten, sondern jegliche Rückweichung zunächst als Reboundphänomen betrachteten. Eine sinnvolle Einteilung bzw. Festlegung eines oberen Grenzwertes im Sinne einer Reboundgrenze war aufgrund der großen Streuung der Ergebnisse nicht adäquat möglich. Der Rebound zeigte sich in unserer Arbeit fast ausschließlich in Richtung der originären Fehlstellung und bestätigt die bereits gewonnen Erkenntnisse früherer Arbeiten (Leveille, Razi und Johnston 2017; Farr et al. 2018).

Unsere Gesamtkohorte beinhaltete die Achskorrekturen eines pathologischen Genu varum und Genu valgum. Diese wurde in der späteren Auswertung der initialen Abweichung nach in zwei Kohorten unterteilt. Beide Kohorten zeigten eine vergleichbar hohe Reboundquote. Die Genu valgum Kohorte war mit 50 Patienten deutlich stärker als die aus zehn Patienten bestehende Genu varum Kohorte. Wir entschieden uns trotz alledem beide Kohorten, wenn auch unabhängig von einander zu untersuchen und auch die schwächere Genu varum Kohorte statistisch auszuwerten. Wie bereits erwähnt, fand darüber hinaus keine weitere Unterteilung innerhalb der Kohorten statt, wie dies in anderen Arbeiten teils Anwendung fand. Park et al. beispielsweise hatten ihre Patienten der Korrekturrate und dem BMI nach in drei Gruppen unterteilt oder eine Einteilung nach unilateralen und bilateralen Korrekturen vorgenommen (Park et al. 2005; Park, Kang und Kim 2016). Diese wurden später einzeln betrachtet und miteinander verglichen. Die Folgen solcher Subgruppierungen waren bei ohnehin kleinen Gesamtkohorten multiple Kleinstgruppen, die eine statistische Beurteilung kaum zuließen. Da auch wir nur eine überschaubare Patientenzahl aufweisen konnten, wurde im Sinne der statistischen Beurteilung

lediglich die Einteilung in eine Varum und Valgum Kohorte vorgenommen. Die mangelnde Spezifikation innerhalb unserer Kohorten limitiert sicherlich die Aussagekraft unserer Ergebnisse und sollte in deren Interpretation stets berücksichtigt werden. Darüber hinaus war ein Vergleich beider Kohorten miteinander schon aufgrund der unterschiedlichen Patientenzahlen nicht möglich und auch nicht Teil dieser Arbeit. In Bezug auf mögliche Einflussfaktoren eines Rebounds zeigen die beiden Kohorten unterschiedliche Ergebnisse, die sich mit den Erkenntnissen vorheriger Arbeiten decken und diese bestätigen.

Gemessen an den klinischen Parametern unserer Kohorten zeigt sich im Vergleich mit der aktuellen Literatur zum Thema temporäre Wachstumslenkung bei Jugendlichen ein repräsentatives Patientenkollektiv (Park, Kang und Kim 2016; Bayhan et al. 2017; Leveille, Razi und Johnston 2017; Farr et al. 2018).

Die durchschnittliche Körpergröße unseres Gesamtkollektives lag bei 166 Zentimetern zum Zeitpunkt der Implantation und 170 Zentimetern bei Metallentfernung. Das Körpergewicht lag im Mittel bei 67,5 Kilogramm vor der Implantation bzw. 71,7 Kilogramm bei Explantation der Eight-Plates. Bezüglich des Körpergewichts und der Körpergröße und dem sich daraus ergebenden Body-Mass-Index von im Mittel $24 \pm 4,7 \text{ kg/m}^2$ präoperativ (Maximum 38 kg/m^2 / Minimum $13,6 \text{ kg/m}^2$) waren unsere Patienten im Vergleich zur gleichaltrigen Bevölkerung übergewichtig (De Onis et al. 2007). In aktuellen Arbeiten zum Thema Juvenile Wachstumslenkung findet sich häufig übergewichtiges Patienten Klientel, eine Tatsache die bereits mehrfach thematisiert wurde und sowohl als eine der Ursachen einer primären Fehlstellung benannt, als auch als möglicher Einflussfaktor eines späteren Rebounds angesehen wird (Niethard 2010; Park, Kang und Kim 2016; Farr et al. 2018). Dabei wird der BMI in seiner Wirkung unterschiedlich interpretiert. Wie bereits erwähnt sehen Park et al. einen hohen BMI möglicherweise als protektiven Faktor an. In ihrer Studie konnte für eine Korrekturrate des tibiofemorale Winkels $< 8,5^\circ$ pro Jahr und einen BMI $< 21 \text{ kg/m}^2$ im Vergleich zur schwereren Kohorte mit einem BMI $> 21 \text{ kg/m}^2$ das Auftreten eines Reboundphänomens häufiger beobachtet werden. Park et al. schlossen daraus, dass ein höherer BMI möglicherweise einen protektiven Einfluss auf das Auftreten eines Reboundphänomens ausüben könnte, ohne dies jedoch weiter erklären zu können (Park, Kang und Kim 2016).

Dementgegen zeigen die Ergebnisse von Farr et al. für jedes zusätzliche kg/m^2 des BMI ein 12,1% höheres Risiko eines Rebounds. In unserer Arbeit zeigte sich lediglich für die Varuskohorte ein signifikanter Zusammenhang des BMI bzw. des Körpergewichts auf einen möglichen Rebound. Dabei zeigte sich ein hohes Gewicht als negativ korrelierender Faktor für die Ausbildung eines Rebounds und bestätigt somit die Ergebnisse von Park et al. Auch in dieser Arbeit können wir dieses Phänomen nicht wegweisend interpretieren. Die ohnehin sehr kleine Varuskohorte war in unserer Studie hinsichtlich der Körpermaße sicherlich kein repräsentatives Patientenkollekt für eine juvenile Wachstumslenkung. Die Kohorte war im Schnitt normgewichtig und zeigte einen für das Alter normwertigen BMI, eine Voraussetzung, die in den meisten Arbeiten zur Wachstumslenkung nicht erfüllt wird, da die Patienten wie oben beschrieben häufig übergewichtig sind. In der größeren eher übergewichtigen Valguskohorte konnte dieser Effekt dementsprechend nicht beobachtet werden. In wie weit das Körpergewicht einen Einfluss auf einen möglichen Rebound hat, können wir somit nicht wegweisend deuten. Wünschenswert wären Studien mit höheren Fallzahlen, die eine Einteilung in verschiedene Gewichtsklassen zulassen, um diese anschließend zu vergleichen.

Anders als bei den körperlichen Parametern herrscht in Bezug auf das Eintrittsalter bei Beginn der Wachstumslenkung weitestgehend Einigkeit. Prinzipiell wird zwischen dem biologischen und dem chronologischen Alter unterschieden. Da diese in den jeweiligen Arbeiten unterschiedlich verwendet werden, fällt eine Vergleichbarkeit der Studien oft schwer.

Park et al. und auch Farr et al. definierten das Eintrittsalter ihrer Patienten anhand des Skelettalters bestimmt nach Greulich und Pyle. Leveille et al. hingegen machten hierzu keine genauen Angaben und ließen die Definition des verwendeten Alters offen (Leveille, Razi und Johnston 2017).

Bei den Jugendlichen in unserer Arbeit war sowohl das biologische als auch das chronologische Alter bestimmt worden. Zur Festlegung des Operationszeitpunktes und der Therapiedauer wurde jedoch durchweg das biologische Alter verwendet. Diese Festlegung halten wir, wie auch Jelinek et al. speziell bei Therapien zur juvenilen Wachstumslenkung für die Sinnvollere, da sie eine genauere Vorhersage über die verbleibende Zeit bis zur Ossifikation der Epiphyse bietet (Jelinek et al. 2012).

In unserer Arbeit lag das radiologisch bestimmte biologische Alter in der O-Beingruppe bei 13 Jahren und in der X-Beingruppe bei 13,5 Jahren. Das durchschnittliche chronologische Alter unserer Gesamtkohorte vor Beginn der Wachstumslenkung lag bei 13,4 Jahren. Ein Jugendlicher war zum Zeitpunkt der Implantation bereits 15,9 Jahre alt. Ein anderer wurde aufgrund der ausgeprägten klinischen Beschwerden durch die Achsenfehlstellung bereits im Alter von 10,9 Jahren operiert. Im Vergleich der Gruppenverteilung nach Genu varum und Genu valgum, ergab sich für die X-Beingruppe ein chronologischer Altersdurchschnitt bei Implantation von 13,6 Jahren, in der O-Beingruppe von 12,8 Jahren. Das biologische und das chronologische Alter waren in unserer Studie damit annähernd gleich. Gemessen an den oben genannten Werten entspricht die Altersverteilung dieser Studie zu Beginn der Wachstumslenkung somit dem in der Literatur üblicherweise angegebenen Alter bei Verwendung einer temporären Epiphysiodese (Park, Kang und Kim 2016; Bayhan et al. 2017; Leveille, Razi und Johnston 2017; Farr et al. 2018).

In unserer Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Alter zu Beginn der Wachstumslenkung einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten eines Reboundphänomens hatte. Es zeigte sich für die X-Beingruppe, dass je jünger die Patienten bei Implantation der Platten waren, desto größer zeigte sich ein Rebound. Diese Tatsache wurde bereits in den oben genannten Arbeiten von Leveille et al. und Farr et al. beschrieben. Auch sie postulierten, dass eine frühe Wachstumslenkung die Gefahr eines möglichen Rebounds erhöht, da die gewünschte Achskorrektur dann meist vor der endgültigen Ossifikation der Epiphysenfugen eintritt. Leveille et al. sahen den Beginn einer temporären Wachstumslenkung vor dem 10. Lebensjahr bei Mädchen und vor dem 12. Lebensjahr bei Jungen im Hinblick auf einen drohenden Rebound als besonders kritisch an. Farr et al. empfehlen die temporäre Epiphysiodese im Hinblick auf einen Rebound erst nach dem 12. Lebensjahr bzw. bei männlichen Patienten sogar erst nach dem 13. Lebensjahr zu beginnen. Sie sehen Jugendliche, die bei Metallentfernung über ein Jahr Restwachstumszeit verfügen als besonders gefährdet an.

Für die Patientengruppe mit O-Beindeformitäten konnte diese Feststellung in der hier vorliegenden Arbeit nicht repliziert werden, auch wenn sich eine Tendenz zu dieser These zeigte. Die geringe Patientenzahl, bei der sich eine statistische Signifikanz nicht

ausbilden konnte, wird hierbei als mögliche Erklärung angesehen. Im optimalen Fall sollte der Zeitpunkt für eine chirurgische Wachstumslenkung so gewählt werden, dass nach Eintritt in eine leichte Überkorrektur der Achsen die Epiphysenfugen weitestgehend verschlossen sind und die Metallentfernung vollzogen werden kann. Dieser Zeitpunkt ist jedoch von vielen Faktoren, insbesondere der Wachstumsgeschwindigkeit des Individuums, sowie vom Korrekturpotential (Korrektur/Zeit) der Eight-Plate abhängig. Das Wachstum, als multifaktorielles Geschehen, unterliegt dabei unterschiedlichen Einflussgrößen, wie Genetik, sozioökonomischem Status oder metabolischen Prozessen und bleibt sicherlich auch in Zukunft aufgrund seines nicht linearen Verhaltens eine unsichere Variable (Castañeda et al. 2008).

Auch die Korrekturpotentiale der Eight-Plate im Sinne einer Achsenkorrektur pro Zeit divergieren in den aktuellen Literaturangaben. So postulierten Bowen und Castañeda eine Korrekturrate der mechanischen Achse nach Hemiepiphysiodese mittels Eight-Plate von 5° tibial und 7° femoral (Bowen et al. 1985; Castañeda et al. 2008). Burghardt, Buller und auch Ballal konnten diese Angaben sowohl tibial als auch femoral noch übertreffen. In Ihren Arbeiten finden sich Korrekturpotentiale von bis zu $9,2^\circ$ pro Jahr auf Seiten des Femurs (Burghardt und Herzenberg 2010; Buller, Schiedel und Rödl 2009; Ballal, Bruce und Nayagam 2010).

In der vorliegenden Arbeit zeigte sich eine durchschnittliche Korrektur des Femurs gemessen am mechanischen lateral distalen Femurwinkel, von durchschnittlich $4,46^\circ$ für die Gesamtkohorte. Tibial konnte im Mittel eine Korrektur von $4,1^\circ$ des mechanischen medial proximalen Tibiawinkels erreicht werden. Für die gesamte Beinachse ergab sich eine Korrektur des mechanischen tibiofemorale Winkels von $4,9^\circ$ in der X-Bein- bzw. $4,3^\circ$ in der O-Beingruppe. Dies entsprach einer durchschnittlichen Korrektur von $0,58^\circ$ bzw. $0,39^\circ$ pro Monat und entsprach den bereits veröffentlichten Werten von Boero et al. (Boero, Michelis und Riganti 2011). Im Bereich des Femurs liegen die Ergebnisse dieser Arbeit etwas unter den oben genannten Korrekturpotentialen der Eight-Plate. Gemessen an der mechanischen Achsendeviation zeigte sich bei einer durchschnittlichen Korrekturdauer von 40 Wochen eine Achsenkorrektur von im Mittel 18,7 mm. Dies entsprach einem durchschnittlichen Korrekturpotential von 2,1 mm pro Monat.

Burghardt und Herzenberg gaben in ihrer Studie ähnliche Werte an. Hier lagen die absoluten Korrekturen bei einer deutlich längeren Korrekturdauer von 14,2 Monaten im Mittel zwar bei 25,4 mm, das Korrekturpotential lag aber lediglich bei 1,74 mm/Monat (Burghardt und Herzenberg 2010). Park et al. werten die Korrektur pro Zeit als entscheidenden Faktor für das Auftreten eines Rebounds. Ihrer Meinung nach steht die Korrekturrate der Epiphysiodese für das Wachstumspotential der Epiphyse. Je größer das Wachstumspotential der Fuge, desto höher sind auch die Korrekturraten. Mit steigendem Potential der Fugen, steige auch das Risiko eines späteren Rebounds. Spätere Arbeiten und auch unsere Ergebnisse zeigen indirekt ähnliche Ergebnisse. In unserer Studie zeigte sich für beide Kohorten die Größe der Korrektur in Millimetern gemessen an der MAD als statistisch signifikanter Parameter eines Rebounds. Je größer die Achskorrektur ausfiel, desto eher zeigte sich eine Rückweichung der Achse nach Metallentfernung. Ähnliche Ergebnisse beschrieben Leveille et al. Hier zeigte sich, dass je größer die initiale Achsabweichung war, desto eher zeigte sich später ein Reboundphänomen. Auch wenn all diese Parameter nicht direkt vergleichbar erscheinen, so spiegeln sie doch alle indirekt das Potential oder die Korrekturkraft der Epiphyse wider. Es scheint, dass Wachstumsfugen mit hohem Korrekturpotential zur Ausbildung eines späteren Rebounds neigen. Unterstrichen wird diese Theorie unserer Meinung nach noch durch den möglichen Zusammenhang der Korrekturzeit mit dem Auftreten eines Rebounds. In unserer Arbeit zeigte sich, dass eine kurze Korrekturzeit mit einer erhöhten Auftretenswahrscheinlichkeit eines Rebounds einhergeht. Auch hier postulieren wir, dass aufgrund des großen Korrekturpotentials der Fuge nur eine kurze Korrekturzeit notwendig würde um die gewünschte Achskorrektur zu erreichen. Ob es hierbei möglicherweise signifikant häufiger zu Metallentfernung vor Abschluss des endgültigen Fugenwachstums kam, ist nur eine mögliche Erklärung für einen anschließenden Rebound. Park et al. postulieren, dass jede Fuge über eine eigene Aktivität verfügt, die sich in der Korrekturrate der Fuge widerspiegelt. Je höher diese Aktivität, desto größer ist die Bereitschaft zur Achskorrektur bzw. Ausbildung eines Rebounds. Boero et al. beschreiben, dass mit zunehmendem Alter der Wachstumsfuge die Korrekturgeschwindigkeit abnimmt und die Wachstumsfuge langsamer wächst (Boero, Michelis und Riganti 2011). Andersherum würde dies bedeuten, dass jüngere Patienten eine höhere Fugenaktivität besitzen, die eine höhere Korrekturrate und

kürzere Korrekturzeiten ermöglicht. Im Hinblick auf unsere Ergebnisse, speziell die der repräsentativen Valgumkohorte, vermuten wir, diesen Effekt beobachten zu können. Es zeigte sich, dass jüngere Patienten zum Zeitpunkt der Implantation und solche mit kurzen Korrekturzeiten, sowie einer großen absoluten Korrektur besonders gefährdet waren einen Rebound auszubilden. Dies unterstreicht die Hypothese von Leveille und Farr et al., eine notwendige Wachstumslenkung möglichst spät zu beginnen. Für jüngere Patienten, die aufgrund einer ausgeprägten Achsabweichung einen hohen Leidensdruck aufweisen und eine frühe Achskorrektur benötigen, wohlwissend des drohenden Rebounds, wäre eine zweizeitige Korrektur denkbar. Durch einen zweiten Eingriff könnte die noch nicht ossifizierte Epiphysenfuge erneut und abschließend korrigiert werden.

Anders verhält es sich bei älteren Patienten oder solchen, die ein wider Erwarten kleineres Korrekturpotential zeigen. Für diese Patienten wäre eine Beschleunigung der Korrektur durch Addition einer weiteren Eight-Plate tibial oder femoral im Verlauf denkbar (Boero, Michelis und Riganti 2011). Beides setzt eine offene und umfassende Kommunikation sowie eine hohe Compliance mit und von den Betroffenen und ihren Angehörigen voraus. Andere Überlegungen sehen in der geplanten Überkorrektur der Beinachse eine mögliche Lösung im Umgang mit einem Rebound (Kapandji 2009). So schrieben Jelinek et al., dass das Reboundphänomen bereits in der Planung einer Achsenkorrektur respektiert und eine gewisse Überkorrektur erzielt werden sollte, ohne jedoch genaue Angaben zur Größe dieser Korrektur machen zu können. Ihre Arbeitsgruppe empfahl deshalb zunächst, alle Patienten die mit einem Reboundphänomen auffielen, bis zum Abschluss ihres Wachstums regelmäßig nach zu kontrollieren (Jelinek et al. 2012). Auch in unserer Arbeit kann keine Aussage über die Größe einer möglicherweise benötigten Überkorrektur getroffen werden. Es zeigte sich wie bereits oben aufgeführt für die Varuskohorte ein durchschnittlicher Rebound von vier Millimetern. Nimmt man an, dass dies der durchschnittliche Rebound für eine vergleichbare Kohorte wäre, würde diese um die genannte Größe überkorrigiert. Auf die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Kohorte angewendet, hätte dies mit Ausnahme eines Falles möglicherweise eine Verbesserung der endgültigen Beinachse ergeben. In der Valguskohorte zeigte sich ein durchschnittlicher Rebound von sieben Millimetern. Eine vergleichbare Überkorrektur hätte bei zehn Patienten eine

Überkorrektur hin zu einer pathologischen Beinachse nach den Werten von Paley bedeutet. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine Überkorrektur dieser Größenordnung im Falle der hier vorliegenden Kohorte nicht mit einer ethisch korrekten Behandlung vereinbar gewesen wäre. Zu beachten ist zudem, dass eine Überkorrektur dieses Ausmaßes durch die Veränderung der Beinachse wahrscheinlich auch die physiologischen Kräfte im Bereich der Epiphysenfuge verändert hätte. Das Resultat hätte somit möglicherweise auch eine Auswirkung auf den nachfolgenden Rebound gehabt, der damit eine nicht vorhersehbare Größe angenommen hätte. Es bleibt somit zunächst auch anhand unserer Daten ungeklärt, wie hoch eine mögliche Überkorrektur sein sollte, um mit Behandlungsabschluss eine physiologische Beinachse zu erreichen. Sinnvoll erscheint die Überlegung von Leveille et al. bei Patienten mit einem hohen Risikopotential für einen Rebound eine Überkorrektur soweit auszureizen, dass eine physiologische Beinachse gerade noch gewährleistet wäre, selbst bei Ausbleiben eines Rebounds (Leveille, Razi und Johnston 2017).

5.3 Zusammenfassung der Diskussion

Die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen dieser Arbeit beruhen auf rein retrospektiven Auswertungen von Daten jugendlicher Patienten der Orthopädischen Klinik Volmarstein ohne die Möglichkeit der Einflussnahme auf die Therapie noch deren Erfolg. Insgesamt konnte die Epiphysiodese durch die Eight-Plate als sicheres und effizientes Verfahren zur Korrektur juveniler Achsfehlstellungen in der Frontalebene bestätigt werden. Im Hinblick auf das Reboundphänomen zeigten sich abhängig von der Art der Achsfehlstellung unterschiedliche Ursachen und mögliche Einflussfaktoren für dessen Auftreten. So zeigten sich wie bereits beschrieben bei Patienten mit einer Valgusdeformität ein junges Alter zu Beginn der Therapie, eine große absolute Korrektur der MAD und eine kurze Korrekturdauer korrelierend mit dem Auftreten eines Rebounds. Bei der nicht vergleichbaren Varuskohorte waren dies ein geringes Körpergewicht, sowie eine große absolute Korrektur der MAD.

Gerade im Hinblick auf mögliche Einflussfaktoren eines Rebounds konnten die Daten der aktuellen Literatur somit bestätigt werden und spiegeln die Erkenntnisse unterschiedlicher zuvor genannter Studien wider. Das die dargestellten statistischen

Ergebnisse dabei nicht deutlicher sind, liegt am ehesten am Studiendesign und der geringen Patientenzahl. Insbesondere die unterschiedliche Kohortenstärke beider Gruppen lässt einen Vergleich der gewonnen Erkenntnisse zwischen den Kohorten nicht zu. Ob die Einflussfaktoren eines Rebounds somit abhängig von der Art der initialen Achsabweichung sind, wie hier angedeutet, kann auch anhand dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Um dies zu beweisen, benötigt es Kohorten mit ähnlicher Patientenstärke. Darüber hinaus wären weitere Subklassifikationen innerhalb der Kohorten sinnvoll. Insbesondere im Hinblick auf die Größe des zu erwartenden Rebounds zeigten sich in unserer Arbeit große Schwankungen. Dies könnte Ausdruck der Inhomogenität der klinischen und radiologischen Daten innerhalb der Kohorten sein. Der Mangel der Erkenntnis über die zu erwartende Größe des Rebounds lässt eine sinnvolle Empfehlung im Umgang mit dessen Auftreten anhand der hier vorliegenden Daten nicht zu. Dies stellt ein allgemeines Problem der aktuellen Literatur dar und zeigt sich in den diskrepanten und teils vagen Aussagen der bisher veröffentlichten Studien. Dass weitere Studien zur juvenilen Wachstumslenkung und dem Auftreten des Reboundphänomens benötigt werden, ist eindeutig. Sinnvollerweise sollten diese über ein prospektives Studiendesign verfügen und eine größere Patientenzahl aufweisen, als die bisher bekannten Arbeiten. Ein hoffnungsvoller Ansatz scheint hier die kürzlich veröffentlichte multinationale Studie von Danino und weiteren Autoren zu sein. Mit dieser Arbeit ist erstmals eine multizentrische Studie mit einer großen Patientenzahl initiiert worden, deren abschließende Ergebnisse spannungsvoll erwartet werden (Danino et al. 2018).

Literaturverzeichnis

- Arazi M, Ögün TC und Memik R. 2001. "Normal Development of the Tibiofemoral Angle in Children: A Clinical Study of 590 Normal Subjects From 3 to 17 Years of Age." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 21 (2).
- Ballal MS, Bruce CE und Nayagam S. 2010. "Correcting Genu Varum and Genu Valgum in Children by Guided Growth: Temporary Hemiepiphysiodesis Using Tension Band Plates." *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume* 92 (2): 273–76.
- Bates D, Mächler M und Bolker B. 2015. "Fitting Linear Mixed-Effects Models using lme4." *Journal of Statistical Software*. 67 (1).
- Bayhan IA, Karatas AF, Rogers KJ, Bowen JR und Thacker MM. 2017. "Comparing Percutaneous Physeal Epiphysiodesis and Eight-Plate Epiphysiodesis for the Treatment of Limb Length Discrepancy." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 37 (5): 323–27.
- Becht S, Bittner RC, Ohmstede A, Pfeiffer A und Roßdeutscher R. 2008. *Lehrbuch Der Röntgendiagnostischen Einstelltechnik: Begründet von Marianne Zimmer-Brossy*. Springer Berlin Heidelberg.
- Blount WP und Clarke GR. 1971. "The Classic. Control of Bone Growth by Epiphyseal Stapling. A Preliminary Report." *Clinical Orthopaedics and Related Research* 77: 4–17.
- Boero S, Michelis MB und Riganti S. 2011. "Use of the Eight-Plate for Angular Correction of Knee Deformities Due to Idiopathic and Pathologic Physis: Initiating Treatment According to Etiology." *Journal of Children's Orthopaedics* 5 (3): 209–16.
- Bowen JR, Leahey JL, Zhang ZH und MacEwen GD. 1985. "Partial Epiphysiodesis at the Knee to Correct Angular Deformity." *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 184–90.
- Brauwer d. V und Moens P. 2008. "Temporary Hemiepiphysiodesis for Idiopathic Genua Valga in Adolescents." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 28 (5): 549–54.
- Brighton CT. 1984. "The Growth Plate." *Orthop Clin North Am* 15 (4): 571–95.

- Buller TC, Schiedel F und Rödl R. 2009. "Temporäre Epiphyseodese mittels 'Eight-Plate' bei Beinlängendifferenzen und Achsfehlstellungen der unteren Extremität im Kindesalter," 2009.
- Burghardt und Herzenberg JE. 2010. "Temporary Hemiepiphysiodesis with the Eight-Plate for Angular Deformities: Mid-Term Results." *Journal of Orthopaedic Science : Official Journal of the Japanese Orthopaedic Association* 15 (5): 699–704.
- Burghardt RD, Herzenberg JE, Standard SC und Paley D. 2008. "Temporary Hemiepiphyseal Arrest Using a Screw and Plate Device to Treat Knee and Ankle Deformities in Children: A Preliminary Report." *Journal of Children's Orthopaedics* 2 (3): 187–97.
- Campens C, Mousny M und Docquier PL. 2010. "Comparison of Three Surgical Epiphysiodesis Techniques for the Treatment of Lower Limb Length Discrepancy." *Acta Orthopaedica Belgica* 76 (2): 226–32.
- Canale ST und Christian CA. 1990. "Techniques for Epiphysiodesis about the Knee." *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 81–85.
- Canale ST, Russell TA und Holcomb RL. 1986. "Percutaneous Epiphysiodesis: Experimental Study and Preliminary Clinical Results." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 6 (2).
- Castañeda P, Urquhart B, Sullivan E und Haynes RJ. 2008. "Hemiepiphysiodesis for the Correction of Angular Deformity about the Knee." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 28 (2): 188–91.
- Cooke TD, Li J und Scudamore RA. 1994. "Radiographic Assessment of Bony Contributions to Knee Deformity." *The Orthopedic Clinics of North America* 25 (3): 387–93.
- Courvoisier A, Eid A und Merloz P. 2009. "Epiphyseal Stapling of the Proximal Tibia for Idiopathic Genu Valgum." *Journal of Children's Orthopaedics* 3: 217–21.
- Danino B, Rödl R, Herzenberg JE, Shabtai L, Grill F, Narayanan U, Segev E und Wientroub S. 2018. "Guided Growth: Preliminary Results of a Multinational Study of 967 Physes in 537 Patients." *Journal of Children's Orthopaedics* 12 (1): 91–96.
- Exner GU. 2003. *Normalwerte in Wachstum Und Entwicklung*. Thieme Verlag.
- Farr S, Alrabai HM, Meizer E, Ganger R und Radler C. 2018. "Rebound of Frontal Plane Malalignment After Tension Band Plating." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 38(7).

- Ferrick MR, Birch JG und Albright M. 2004. "Correction of Non-Blount's Angular Knee Deformity by Permanent Hemiepiphyseodesis." *Journal of Pediatric Orthopedics* 24 (4): 397–402.
- Fick R. 2013. Handbuch Der Anatomie und Mechanik der Gelenke unter Berücksichtigung der bewegenden Muskeln. Dogma Verlag.
- Galla M und Lobenhoffer P. 2007. "Achsenfehlstellungen - Knie." *Orthopädie und Unfallchirurgie Update* 2 (1): 21–40.
- Gladbach B, Pfeil J, Heijens E. 2000. "Die Perkutane Epiphyseodesese - Behandlung von Beinlängendifferenzen und Achsfehlstellungen in Der Frontalebene." *Der Orthopäde* 1: 2–8.
- Gladbach B und Heijens E. 2008. "Planung und Simulation Komplexe Umstellungsosteotomien bei digitaler Radiographie der unteren Extremitäten." *Orthopädie im Profil*. GIT Verlag 2:31-35
- Haas SL. 1945. "Retardation of Bone Growth by a Wire Loop." *The Journal of Bone & Joint Surgery* 27 (1): 25–36.
- . 1948. "Mechanical Retardation of Bone Growth." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 30A: 506–12.
- Hasler CC. 2000. "Leg Length Inequality. Indications for Treatment and Importance of Shortening Procedures." *Der Orthopäde* 29: 766–74.
- Heath CH und Staheli LT. 1993. "Normal Limits of Knee Angle in White Children--Genu Varum and Genu Valgum." *Journal of Pediatric Orthopedics* 13 (2): 259–62.
- Hefti F. 2000. "Deviations in the Axes of the Lower Extremities." *Der Orthopäde* 29 (9): 814–20.
- Hefti F. 1997. *Kinderorthopädie in Der Praxis*. Springer Berlin Heidelberg.
- Hernigou P, Medevielle D, Debeyre J und Goutallier D. 1987. "Proximal Tibial Osteotomy for Osteoarthritis with Varus Deformity. A Ten to Thirteen-Year Follow-up Study." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 69: 332–54.
- Heyne JP, Merbold H, Sehner J, Neumann R, Freesmeyer M, Jonetz-Mentzel L und Kaiser WA. 1999. "Reduction of Radiation Dose by Using Digital Luminescence Radiography Compared to Conventional Screen Film System with Grid Cassette." *Rofo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden*

- Verfahren 171 (1): 54–59.
- Hsu RW, Himeno S, Coventry MB und Chao EY. 1990. "Normal Axial Alignment of the Lower Extremity and Load-Bearing Distribution at the Knee." *Clinical Orthopaedics and Related Research*, no. 255 (June): 215–27.
- Hunter DJ, Niu J, Felson DT, Harvey WF, Gross KD, McCree P, Aliabadi P, Sack B und Zhang Y. 2007. "Knee Alignment Does Not Predict Incident Osteoarthritis: The Framingham Osteoarthritis Study." *Arthritis and Rheumatism* 56: 1212–18.
- Ilharreborde B, Gaumetou E, Souchet P, Fitoussi F, Presedo A, Pennecot GF und Mazda K. 2012. "Efficacy and Late Complications of Percutaneous Epiphysiodesis with Transphyseal Screws." *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume* 94 (2): 270–75.
- Jelinek EM, Bittersohl B, Martiny F, Scharfstädt A, Krauspe R und Westhoff B. 2012. "The 8-Plate versus Physeal Stapling for Temporary Hemiepiphyseodesis Correcting Genu Valgum and Genu Varum: A Retrospective Analysis of Thirty Five Patients." *International Orthopaedics* 36 (3): 599–605.
- Kapandji IA. 2009. *Funktionelle Anatomie der Gelenke*. Stuttgart: Thieme Verlag.
- Kumar A, Gaba S, Sud A, Mandlecha P, Goel L und Nayak M. 2016. "Comparative Study between Staples and Eight Plate in the Management of Coronal Plane Deformities of the Knee in Skeletally Immature Children." *Journal of Children's Orthopaedics* 10 (5): 429–37.
- Kuznetsova A, Christensen RHB und Bavay C, Brockhoff PB. 2014. "Automated mixed ANOVA modeling of sensory and consumer data." *Food Quality and Preference* 40: 31–38.
- Lanz von T und Wachsmuth W. 1935. *Praktische Anatomie. Ein Lehr- und Hilfsbuch der Anatomischen Grundlagen Ärztlichen Handelns. Erster Band/Vierter Teil: Bein und Statik*. Springer Berlin Heidelberg.
- Leveille LA, Razi O und Johnston CE. 2017. "Rebound Deformity After Growth Modulation in Patients With Coronal Plane Angular Deformities About the Knee: Who Gets It and How Much?" *Journal of Pediatric Orthopedics*, May.
- Maquet P. 2014. "The Biomechanics of the Knee and Surgical Possibilities of Healing Osteoarthritic Knee Joints." *Clinical Orthopaedics and Related Research* 146: 102–10.

- Metaizeau JP, Wong-Chung J et al. 1998. "Percutaneous Epiphysiodesis Using Transphyseal Screws (PETS)." *Journal of Pediatric Orthopaedics* 18 (3): 363–69.
- Mikulicz-Radecki von J. 1878. *Ueber individuelle Formdifferenzen am Femur und an der Tibia des Menschen: Mit Berücksichtigung der Statik des Kniegelenks*. Veit.
- Moreland JR, Bassett LW und Hanker GJ. 1987. "Radiographic Analysis of the Axial Alignment of the Lower Extremity." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 69 (5): 745–49.
- Niethard FU. 2010. *Kinderorthopädie*. Thieme.
- Nouth F und Kuo LA. 2004. "Percutaneous Epiphysiodesis Using Transphyseal Screws (PETS): Prospective Case Study and Review." *J Pediatr Orthop* 24.
- Oest O, Frank W und Rettig H. 1974. "Die Röntgenganzaufnahme in der Operationsplanung von Korrekturosteotomien der Beine." *Z Orthop* 112 (2): 344–47.
- Onis de M, Onyango AW, Borghi E, Siyam A, Nishida C und Siekmann J. 2007. "Development of a WHO Growth Reference for School-Aged Children and Adolescents." *Bulletin of the World Health Organisation* 85 (10): 812–19.
- Paley D und Pfeil J. 2000. "Prinzipien Der Kniegelenknahen Deformitätenkorrektur." *Der Orthopäde*.
- Paley D, Herzenberg JE, Tetsworth K, McKie J und Bhave A. 1994. "Deformity Planning for Frontal and Sagittal Plane Corrective Osteotomies." *The Orthopedic Clinics of North America* 25: 425–65.
- Paley D und Herzenberg JE. 2005. *Principles of Deformity*. Springer Berlin Heidelberg.
- Park S-S, Kang S und Kim JY. 2016. "Prediction of Rebound Phenomenon after Removal of Hemiepiphyseal Staples in Patients with Idiopathic Genu Valgum Deformity." *The Bone & Joint Journal* 98-B (9): 1270–75.
- Park S-S, Gordon JE, Luhmann SJ, Dobbs MB und Schoenecker PL. 2005. "Outcome of Hemiepiphyseal Stapling for Late-Onset Tibia Vara." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 87 (10): 2259–66.
- Pauwels F. 1973. *Atlas zur Biomechanik der Gesunden und kranken Hüfte*. Springer Berlin Heidelberg.
- . 1936. "Der Schenkelhalsbruch: Ein Mechanisches Problem." *British Journal of Surgery* 23 (92): 874–874.

- . 1948. "Die Bedeutung der Bauprinzipien des Stütz-und Bewegungsapparates für die Beanspruchung der Röhrenknochen." *Zeitschrift Für Anatomie Und Entwicklungsgeschichte* 114 (1–2): 129–66.
- . 1965a. "Funktionelle Anpassung Des Knochens Durch Längenwachstum." In *gesammelte Abhandlungen zur Funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates*, 400–423. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- . 1965b. "Grundriß einer Biomechanik der Frakturheilung." In *gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates*, 139–82. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Petersen TL und Engh GA. 1988. "Radiographic Assessment of Knee Alignment after Total Knee Arthroplasty." *The Journal of Arthroplasty* 3 (1): 67–72.
- Pyle SI und Greulich WW. 1959. *Radiographic Atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist*. Stanford: Stanford University Press.
- R Development Core Team. 2015. "R Installation and Administration." *R Development Core Team*. 3: 66.
- Raab P, Wild A, Seller K und Krauspe R. 2001. "Correction of Length Discrepancies and Angular Deformities of the Leg by Blount's Epiphyseal Stapling." *European Journal of Pediatrics* 160: 668–74.
- Radler C, Ganger R und Grill F. 2010. "Erfahrungen Mit Der Eight-Plate." 2010.
- Rauber A und Kopsch F. 2003. *Anatomie des Menschen. Band I, Bewegungsapparat*. Thieme Verlag.
- Salenius P und Vankka E. 1975. "The Development of the Tibiofemoral Angle in Children." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 57 (2):259–61.
- Stevens PM. 2006. "Guided Growth: 1933 to the Present." *Strategies in Trauma and Limb Reconstruction* 1 (1): 29–35.
- Stevens PM. 2007. "Guided Growth for Angular Correction: A Preliminary Series Using a Tension Band Plate." *Journal of Pediatric Orthopedics* 27 (3): 253–59.
- Strasser H. 1908. *Lehrbuch der Muskel- und Gelenkmechanik*. Berlin: Verlag von Julius Springer.
- Strecker W und Keppler P. 2014. "Analyse und Korrektur von Beindeformitäten." *Der Unfallchirurg* 105 (9): 811–29.
- Strecker W, Keppler P und Kinzl L, eds. 1997. *Posttraumatische Beindeformitäten*.

-
- Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tanamas S, Hanna FS, Cicuttini FM, Wluka AE, Berry P und Urquhart DM. 2009. "Does Knee Malalignment Increase the Risk of Development and Progression of Knee Osteoarthritis? A Systematic Review." *Arthritis Care and Research* 61: 459–67.
- Vogt B, Schiedel F und Rödl R. 2014. "Guided Growth in Children and Adolescents. Correction of Leg Length Discrepancies and Leg Axis Deformities." *Der Orthopäde* 43 (3): 267–84.
- Waldt S, Eiber M und Wörtler K. 2011. *Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie*. Thieme.
- Westhoff B, Jäger M und Krauspe R. 2007. "Axes of the Legs in Childhood. What Is Pathologic?." *Der Orthopäde* 36 (5): 485–98; quiz 499–500.
- Wiemann JM, Tryon C und Szalay EA. 2009. "Physeal Stapling versus 8-Plate Hemiepiphysiodesis for Guided Correction of Angular Deformity about the Knee." *Journal of Pediatric Orthopedics* 29 (5): 481–85.
- Wirtz C und Zumtein MA. 2011. "Knie-Achsendeviationen - Ursache Für Gonarthrose." *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie* 59 (4):169–73.
- Wright JG, Treble N und Feinstein AR. 1991. "Measurement of Lower Limb Alignment Using Long Radiographs." *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume* 73 (5): 721–23.
- Yoshioka Y, Siu D und Cooke TD. 1987. "The Anatomy and Functional Axes of the Femur." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 69 (6): 873–80.
- Zhai G, Ding C, Cicuttini FM und Jones G. 2007. "A Longitudinal Study of the Association between Knee Alignment and Change in Cartilage Volume and Chondral Defects in a Largely Non-Osteoarthritic Population." *The Journal of Rheumatology* 34 (1): 181–86.
- Zuege RC, Kempken TG und Blount WP. 1979. "Epiphyseal Stapling for Angular Deformity at the Knee." *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume* 61 (3): 320–29.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Die sechs Freiheitsgrade des Kniegelenks (Rauber und Kopsch 2003).....	1
Abb. 2 Jährliches Körperlängenwachstum (Niethard 2010).....	4
Abb. 3 Anteile der Wachstumszonen der unteren Extremität an der Länge des Femurs bzw. der Tibia (a) und des gesamten Beines (b) (Exner 2003).....	5
Abb. 4 Die Beinachse im Kindesalter – das umwegige Wachstum (Strecker, Keppler, und Kinzl 1997).....	7
Abb. 5 Physiologische Entwicklung der Beinachse in der Frontalebene (Fick 2013).....	8
Abb. 6 aTFW (Paley und Herzenberg 2005).....	10
Abb. 7 mTFW (Paley und Herzenberg 2005).....	10
Abb. 8 Überblick über a) mechanische und b) anatomische Achsen bzw. Winkel der unteren Extremität in der Frontalebene (Paley und Herzenberg 2005)	11
Abb. 9 Mechanische Beinachse und MAD (Paley und Herzenberg 2005)	11
Abb. 10 Definition Valgus-/Varusdeviation des Kniegelenks (Galla und Lobenhoffer 2007)	13
Abb. 11 Systematische Analyse einer Achsenfehlstellung mit dem Malalignment-Test nach Paley (Galla und Lobenhoffer 2007).....	14
Abb. 12 Korrelation zwischen dem TFW und dem medialen Flächendruck (Zhai et al. 2007; Hunter et al. 2007)	15
Abb. 13 Temporäre Epiphysiodese mittels PETS (Metaizeau und Wong- Chung 1998)	22
Abb. 14 Temporäre Epiphysiodese mittels Eight-Plate (Orthopädische Kliniken Volmarstein)	23
Abb. 15 Vermessung der Beinachse mit der Software OsiriX 4.0 für Macintosh (Orthopädische Kliniken Volmarstein).....	32
Abb. 16 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein) a) präoperativ.b) Verlaufskontrolle.....	34
Abb. 17 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein) c) Abschlussuntersuchung.....	35
Abb. 18 Korrektur eines Genu Varum (Orthopädische Klinik Volmarstein) a) präoperativ.b) Verlaufskontrolle.....	36
Abb. 19 Korrektur eines Genu Valgum (Orthopädische Klinik Volmarstein) c) Abschlussuntersuchung.....	37

Diagrammverzeichnis

Diagr. 1 Geschlechterverteilung unter Berücksichtigung der Achsenfehlstellung	38
Diagr. 2 Vergleich der Lokalisation der Epiphysiodese.....	40
Diagr. 3 Verteilung des chronologischen Alters in Jahren, <i>Mittelwert (SD)</i>	41
Diagr. 4 Verteilung des Körpergewichts in Kilogramm, <i>Mittelwert (SD)</i>	42
Diagr. 5 Verteilung der Körpergröße in Zentimeter, <i>Mittelwert (SD)</i>	42
Diagr. 6 Verteilung des BMI in Kilogramm/m ² , <i>Mittelwert (SD)</i>	42
Diagr. 7 Korrektur- bzw. Nachuntersuchungszeiträume in Wochen, <i>Mittelwert (SD)</i> ...	43
Diagr. 8 Biologisches Alter in Jahren, <i>Mittelwert (SD)</i>	45
Diagr. 9 Entwicklung des mLDFW in Winkelgrad, <i>Mittelwert (SD)</i>	46
Diagr. 10 Entwicklung des mMPTW in Winkelgrad, <i>Mittelwert (SD)</i>	47
Diagr. 11 Entwicklung des mTFW in Winkelgrad, <i>Mittelwert (SD)</i>	48
Diagr. 12 Entwicklung der mechnischen Achsendeviation in Millimetern, <i>Mittelwert (SD)</i>	49
Diagr. 13 Korrektur bzw. Rebound der mechanischen Achsendeviation in Millimetern, <i>Mittelwert (SD)</i>	49
Diagr. 14 Korrekturpotentiale der mechanischen Achsendeviation in Millimetern pro Monat, <i>Mittelwert (SD)</i>	50
Diagr. 15 Anzahl der Patienten in der radiologischen Norm nach Paley bzw. Galla u. Lobenhoffer gemessen an der mechanischen Achsendeviation.....	50
Diagr. 16 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem biologischen Alter bei OP (Jahren).....	53
Diagr. 17 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem chronologischen Alter bei OP (Jahren).....	54
Diagr. 18 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Körpergewicht bei OP (Kg)....	55
Diagr. 19 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Körpergröße bei OP (cm).....	56
Diagr. 20 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Geschlecht.....	57
Diagr. 21 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Seitenlokalisierung der Epiphysiodese.....	58
Diagr. 22 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Korrekturdauer (Wochen).....	59
Diagr. 23 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Nachuntersuchungsdauer (Wochen).....	60
Diagr. 24 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der MAD-Korrektur (mm).....	61
Diagr. 25 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem biologischen Alter bei OP (Jahren).....	63
Diagr. 26 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem chronologischen Alter bei OP (Jahren).....	64
Diagr. 27 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Körpergewicht bei OP (Kg)....	65
Diagr. 28 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Körpergröße bei OP (cm).....	66
Diagr. 29 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit dem Geschlecht.....	67

Diagr. 30 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Seitenlokalisation der Epiphysiodese.....	68
Diagr. 31 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Korrekturdauer (Wochen).....	69
Diagr. 32 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der Nachuntersuchungsdauer (Wochen).....	70
Diagr. 33 Vergleich des MAD-Rebounds (mm) mit der MAD-Korrektur (mm).....	71

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Stabilisatoren des Kniegelenks (Rauber und Kopsch 2003).....	2
Tab. 2 Ursachen kindlicher Achsendeviationen in der Frontalebene (Niethard 2010) ..	17
Tab. 3 Verwendete Winkel und Achsen der unteren Extremität	30
Tab. 4 Lokalisation der Epiphysiodese	39
Tab. 5 Übersicht der Anamnesedaten nach Kohorten (Mittelwert; <i>SD</i>).....	44
Tab. 6 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mLDFW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/ <i>SD</i>).....	51
Tab. 7 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mMPTW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/ <i>SD</i>).....	51
Tab. 8 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen am mTFW in Winkelgrad (Mittelwert/Minimum/Maximum/ <i>SD</i>).....	52
Tab. 9 Ergebnisse der radiologischen Daten gemessen an der MAD in Millimetern (Mittelwert/Minimum/Maximum/ <i>SD</i>).....	52
Tab. 10 Statistische Auswertung Gruppe Genu valgum.....	62

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die dem Fachbereich Medizin Marburg zur Promotionsprüfung eingereichte Arbeit mit dem Titel „Analyse des Reboundphänomen und dessen Einflussfaktoren nach temporärer Hemi-Epiphysiodese mittels Eight-Plate im Kindesalter “ in der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie unter Leitung von Frau Professorin Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann mit Unterstützung durch Dr. med. Benedikt Leidinger ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keinem in- oder ausländischen Medizinischen Fachbereich ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht, noch die vorliegende oder eine andere Arbeit als Dissertation vorgelegt.

Ich versichere, dass ich sämtliche wörtlichen oder sinngemäßen Übernahmen und Zitate kenntlich gemacht habe.

Mit dem Einsatz von Software zur Erkennung von Plagiaten bin ich einverstanden.

Marburg, März 2020

Thomas Schriener

„Die Hinweise zur Erkennung von Plagiaten habe ich zur Kenntnis genommen.“

Marburg, März 2020

Prof. Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann

Verzeichnis der akademischen Lehrer

Universität Marburg

Meine akademischen Lehrer waren die Damen / Herren:

Prof. Dr. R. Barth, Prof. Dr. D. K. Bartsch, Prof. Dr. E. Baum, Prof. Dr. K. Becker, Prof. Dr. S. Becker, Prof. Dr. R. Berger, Prof. Dr. S. Bien, Prof. Dr. S.K. Bohlander, Prof. Dr. Y. Cetin, Prof. Dr. F. Czubayko, Prof. Dr. A. del Rey, Prof. Dr. V. Ellenrieder, Prof. Dr. R. Engenhart-Cabillic, Dr. B. Feuser, Prof. Dr. S. Fuchs- Winkelmann, Prof. Dr. C. Görg, Prof. Dr. T. Gress, Dr. K. Grundmann, Prof. Dr. K.- H. Grzeschik, Prof. Dr. M. Hertl, Prof. Dr. J. Heverhagen, Prof. Dr. R. Hofmann, PD Dr.H. Höffken, Prof. Dr. A. Hoyer, Prof. Dr. W. Hundt, Prof. Dr. Dr. P.H. Kann, Prof. Dr. T. Kircher, Prof. Dr. K.-J. Klose, Dr. B. Kolb-Niemann, Prof. Dr. J. Koolmann, Prof. Dr. M. Kühnert, Prof. Dr. R. Lill, Prof. Dr. M. Löffler, Prof. Dr. M. Lohoff, Prof. Dr. med. A.H. Mahnken, Prof. Dr. R. F. Maier, Prof. Dr. B. Maisch, Prof. Dr. R. Moll, Prof. Dr. R. Moosdorf, Prof. Dr. U. O. Mueller, Prof. Dr. R. Mutters, Prof. Dr. A. Neubauer, Prof. Dr. med. C. Nimsky, Prof. Dr. Dr. W.H. Oertel, Prof. Dr. D. Oliver, Prof. Dr. A. Pagenstecher, Prof. Dr. T. Plant, PD Dr. R. Preisig-Müller, Dr. A. Ramaswamy, Prof. Dr. H. Renz, Prof. Dr. K.-H. Röhm, Prof. Dr. S. Ruchholtz, Prof. Dr. I. Sahmland, Prof. Dr. H. Schäfer, Prof. Dr. J. Schäfer, Prof. Dr. S. Schmidt, Prof. Dr. J. Seitz, Prof. Dr. W. Sekundo, Prof. Dr. B. Steiniger, Prof. Dr. C. F. Vogelmeier, Prof. Dr. U. Wagner, Prof. Dr. J.A. Werner, Dr. R. Westermann, Prof. Dr. E. Weihe, Prof. Dr. H. Wulf.

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle zunächst meinen Eltern, ohne die dieses Studium und diese Arbeit nie möglich gewesen wären.

Ich möchte mich bei Frau Professorin Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann bedanken, die diese Arbeit angenommen und ermöglicht hat.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. med. Benedikt Leidinger, der mich über die Zeit nicht nur betreut hat, sondern mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Für seine unkomplizierte Art der Unterstützung und ausgeprägte Geduld zu jeder Tag- und Nachtzeit bin ich sehr dankbar.

Desweiteren danke ich Frau Ute Schäfer und Frau Karin Streck, der gesamten Radiologische Abteilung und den Kolleginnen des Archivs der Orthopädischen Klinik Volmarstein. Durch ihre Mithilfe ist die Datensammlung erst möglich geworden.

Weil Arbeiten dieser Art nicht Grundlage der medizinischen Ausbildung sind, bedarf es eines hohen Maßes an Disziplin und Ausdauer. Da diese Eigenschaften im Laufe der Entstehung in manchen Momenten abhanden kommen, benötigt man manchmal mentale Unterstützung sowie aufbauende Worte. Dafür danke ich meinem Bruder, seiner Frau Julia und meinen beiden Großmüttern. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Ganz besonders erwähnen möchte ich meine Freundin Nancy, die mich das ganze Studium über und durch diese Arbeit hindurch immer unterstützt und motiviert hat. Ich danke Dir sehr.

